



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ELINA MALASSU  
ESISELVITYS RADAN KUORMITUSKESTÄVYYSMITOITUKSEN  
KEHITTÄMISESTÄ

Diplomityö

Tarkastajat: Professori Pauli Kolisoja  
ja DI Heikki Luomala  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
taneuvoston kokouksessa 17. elo-  
kuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**ELINA MALASSU:** Esiselvitys radan kuormituskestävyyssmitoituksen kehittämisestä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 114 sivua, 0 liitesivua

Lokakuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Infrarakenteet

Tarkastajat: Professori Pauli Kolisoja ja DI Heikki Luomala

**Avainsanat:** kuormituskestävyys, korkeuspoikkeaman muutosnopeus, taipuma

Kuormituskestävyydellä tarkoitetaan tämän työn yhteydessä ratarakenteen kykyä vastustaa liikenne- ja ympäristökuormitusten yhteisvaikutuksesta johtuvia pysyviä ratageometrian muutoksia. Kuormituskestävyyssmitoituksen tarkoituksena on pyrkiä siihen, että radan heikkeneminen tapahtuu tasaisesti sekä ratalinjan että radan rakenneosien tasolla. Tasaisella heikkenemisellä voidaan pienentää radan elinkaarikustannuksia.

Tässä tutkimuksessa perehdyttiin radan kuormituskestävyyteen vaikuttaviin tekijöihin kirjallisuusselvityksen avulla sekä tarkasteltiin näiden kuormituskestävyyteen vaikuttavien radan ominaisuuksien välisiä vaikutussuhteita esimerkkikohteessa. Taustaksi tälle tarkastelulle esiteltiin olemassa olevalta radalta saatavia lähtötietoja sekä toimenpiteitä, joilla olemassa olevan radan kuormituskestävyyttä voidaan parantaa. Tutkimuksessa kuvattiin lyhyesti myös mitoitusmenetelmiä, joiden pohjalta kuormituskestävyyssmitoitusta voitaisiin tulevaisuudessa kehittää.

Esimerkkikohteen lähtötietojen välille pyrittiin löytämään vaikutussuhteita vertaamalla radan ominaisuuksia kuormituskestävyyttä parhaiten kuvaaviin lähtötietoihin eli radan korkeuspoikkeamaan ja taipumaan. Korkeuspoikkeamadatasta muodostettiin uusi suure, korkeuspoikkeaman keskihajonnan muutosnopeus, jonka todettiin kuvaavan hyvin radan kuormituskestävyyttä. Vertailuja tehtiin myös luokittelemalla radan ominaisuuksia neljään luokkaan. Luokittelun avulla voitiin tarkastella useampaa kuin kahta ominaisuutta yhtäaikaaisesti ja eliminoida haluttujen suureiden vaikutus tulokseen.

Kirjallisuusselvityksen perusteella radan kuormituskestävyyden todettiin olevan hyvin monimutkainen kokonaisuus, jossa yksittäistä ominaisuutta ei voida tarkastella irrallaan kokonaisuudesta, eikä tarkasteltuja mitoitusmenetelmiä voida suoraan soveltaa rataympäristöön tai Suomen ilmasto-olosuhteisiin. Esimerkkikohteen tarkastelussa havaittiin, että alusrakennekerroksen paksuudella ja sivuojen syvyydellä oli merkittävin vaikutus kuormituskestävyyttä kuvaaviin suureisiin. Alusrakennekerroksen paksuuden ja sivuojen syvyyden kasvaessa radan kuormituskestävyyden voidaan olettaa paranevan. Uuden tukikerroksen havaittiin jossain määrin yllättävästi nopeuttavan korkeuspoikkeamien syntymistä.

## ABSTRACT

**ELINA MALASSU:** A Preliminary study of the development of a load bearing capacity based design method for railway track

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 114 pages, 0 Appendix pages

October 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Infrastructures

Examiners: Professor Pauli Kolisoja and M.Sc. Heikki Luomala

Keywords: load bearing capacity, gradient of longitudinal level, vertical deflection

In this thesis the term *load bearing capacity* refers to the ability of railway track to resist permanent deformations caused by traffic loads and environmental loads. The aim of using a design method based on load bearing capacity is to ensure slow and even deterioration of track line and components of track structure. Even deterioration reduces the life cycle costs of the railway.

Factors which affect the load bearing capacity of track were studied in this research by means of a literature review. Relations between these factors were studied with the help of an example case. Source information which can be obtained from existing track and actions which can be taken to improve the load bearing capacity of existing track were examined briefly. Also some design methods which could act as a basis for future design method based on load bearing capacity were briefly described.

An attempt was made to find relations between factors affecting load bearing capacity by comparing properties of track with factors which represents best the load bearing capacity of track. These factors were assumed to be the longitudinal level and the vertical deflection. A new quantity, the gradient of standard deviation of longitudinal level, was formed from several sequential track inspections. Gradient of longitudinal level was found to describe well the load bearing capacity. Some comparisons were made by classifying the properties into four classes. By classification more than two properties could be compared simultaneously and the effect of desired properties on the result could be eliminated.

On the basis of the literature review it was stated that the load bearing capacity of track is a very complex phenomenon. The track properties cannot be examined individually out of context. The examined design methods cannot be adapted directly to a track environment or to the climatic conditions in Finland. In the examination of the case study it was noticed that the thickness of subballast and the depth of ditches had the most significant effect on the factors which describe best the load bearing capacity. When the thickness of subballast and the depth of ditches increase, it can be supposed that the load bearing capacity of track improves. It was also noticed that a new ballast accelerates the development of vertical irregularities which was slightly surprising.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisessä yliopistossa Rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Tutkimus on osa Liikenneviraston rahoittamaa Elinkaaritehokas rata (TERA) II –hanketta.

Sukeltaminen näin laajaan ja monimutkaiseen, ennalta tutkimattomaan aiheeseen oli antoisaa ja innostavaa, mutta ajoittain raskastakin. Onnekseni tällä tutkimusmatkallani mukana rämpivät myös professori Pauli Kolisoja ja projektipäällikkö Heikki Luomala, joiden kanssa sain purettua diplomityön aiheuttamaa ahdistustani, ja joiden neuvojen ja ideoiden avulla luovittiin aina hiljalleen eteenpäin ja nähtiin välillä jopa valoa tunnelin päässä. Suuri kiitos heille aiheesta ja työni ohjaamisesta. Mukaan tälle tutkimusmatkalle saimme houkuteltua myös Mika Silvastin (Roadscanners Oy), jonka apu lähtötietojen ja ohjelmiston käytön kanssa oli kullanarvoista. Kiitos hänelle siitä. Kiitos kuuluu myös MPR:n henkilökunnalle. Heiltä sain apua ja tukea aina tarvittaessa sekä muuta ajateltavaa kahvitauoilla.

Kiitos ”vanhoille” lukioaikaisille ystäväilleni, jotka jaksoivat koko opiskeluaikani kuunnella ja myötäellä ilojani ja murheitani, ja joiden avulla sain tarvittavaa etäisyyttä teekkarielämään. Erityisen iso kiitos kaikille ”uusille” TTY:ltä löytämilleni ystäville. Ilman teitä nämä 6 vuotta olisivat olleet paljon tylsempiä ja harkkatöiden parissa vietetyt yöt olisivat tuntuneet huomattavasti pidemmiltä ja synkemmiltä.

Kiitos vanhemmilleni ja siskoilleni tuesta ja kannustuksesta matkallani pienestä, junaradoilla ja legoilla leikkivästä insinöörinalusta diplomi-insinööriksi asti. Viimeisenä, muttei vähäisimpänä, haluan kiittää Jereä saamastani rajattomasta ymmärryksestä ja tuesta diplomityöprosessin ja opiskelun aikana.

Opiskeluaika oli mahtavaa, mutta nyt on aika suunnata kohti uusia seikkailuja!

Tampereella, 21. syyskuuta 2016

Elina Malassu



# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	RADAN KUORMITUSKESTÄVYYS .....	3
2.1	Mitä on radan kuormituskestävyys? .....	3
2.2	Radan kuormituskestävyyteen liittyviä määritelmiä .....	3
2.2.1	Ratarakenteen käyttöikä .....	3
2.2.2	Liikennemäärä .....	4
2.3	Heikon kuormituskestävyyden ilmenemismuodot .....	6
2.4	Kuormituskestävyyssmitoituksen hyödyt .....	6
3.	RADAN KUORMITUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	7
3.1	Ratarakenne .....	7
3.1.1	Ratarakenteen osat .....	7
3.1.2	Raide .....	8
3.1.3	Ratapenger .....	15
3.1.4	Pohjamaa .....	20
3.2	Ympäristöolosuhteet .....	23
3.2.1	Kuivatusolosuhteet .....	24
3.2.2	Routa .....	26
3.3	Junakuormat .....	29
3.3.1	Junakuormien ominaispiirteet .....	29
3.3.2	Pystykuormat .....	30
3.3.3	Poikittaiskuormat .....	32
3.3.4	Pitkittäiskuormat .....	32
4.	RADAN KUORMITUSKESTÄVYYSSMITOITUKSESSA TARVITTAVAT LÄHTÖTIEDOT .....	35
4.1	Geometriavirhehistoria .....	35
4.2	Kokonaisjäykkyys .....	38
4.2.1	Pistemäiset mittausmenetelmät .....	38
4.2.2	Jatkuvatoimiset mittausmenetelmät .....	40
4.3	Kerrospaksuudet .....	42
4.4	Pengermateriaalien ominaisuudet .....	44
4.5	Pohjamaan ominaisuustiedot .....	45
4.5.1	Maaperäkartta .....	45
4.5.2	Pohjatutkimukset .....	46
5.	KUORMITUSKESTÄVYYSSMITOITUKSEN LÄHESTYMISTAPOJA .....	48
5.1	Odemarkin kantavuusmitoitus .....	48
5.2	Analyttinen mitoitusmenetelmä .....	50
5.3	Leikkausmuodonmuutoksiin perustuva pengerleveysmitoitus .....	53
5.4	Kansainväliset menetelmät .....	54
6.	KUORMITUSKESTÄVYYDEN PARANTAMINEN OLEMASSA OLEVILLA RADOILLA .....	57

6.1	Raidesepelin puhdistus ja vaihtaminen .....	57
6.2	Kuivatuksen parantaminen .....	58
6.3	Väli- ja eristyskerroksen parantaminen .....	59
6.4	Geovahvisteet .....	59
6.5	Pohjamaahan kohdistuvat toimenpiteet .....	61
6.6	Epäjatkuvuuskohtien tasoittaminen .....	62
7.	LÄHTÖTIETOJEN VAIKUTUSSUHTEIDEN VERTAILU ESIMERKKIKOHTEESSA .....	64
7.1	Esimerkkikohteen kuvaus .....	64
7.2	Lähtötiedot .....	65
7.3	Eri lähtötietojen väliset yhteydet .....	67
7.3.1	Korkeuspoikkeama – rakennekerrosten paksuudet .....	67
7.3.2	Korkeuspoikkeama – kosteustila ja ojasyvyys .....	69
7.3.3	Korkeuspoikkeama – taipuma .....	73
7.3.4	Korkeuspoikkeama – tukikerroksen ikä .....	74
7.3.5	Taipuma – kerrospaksuus .....	75
7.3.6	Taipuma – kosteustila ja ojasyvyys .....	77
7.3.7	Taipuma – tukikerroksen ikä .....	79
7.4	Korkeuspoikkeaman hajonnan muutosnopeus .....	80
7.4.1	Korkeuspoikkeaman muutosnopeuksien vertailu .....	83
7.4.2	Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – kerrospaksuudet .....	86
7.4.3	Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – kosteustila ja ojasyvyys ....	88
7.4.4	Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – taipuma .....	90
7.4.5	Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – tukikerroksen ikä .....	90
7.5	Radan ominaisuuksien vertailu luokiteltujen mittausarvojen perusteella ....	91
7.5.1	Korkeuspoikkeaman muutosnopeus - taipuma eri kosteustiloissa, sepelin ikä vakio .....	93
7.5.2	Korkeuspoikkeaman muutosnopeus - alusrakenteen paksuus eri kosteustiloissa, tukikerroksen ikä ja paksuus vakio .....	96
7.6	Yhteenveto tuloksista .....	101
7.6.1	Vertailut lähtötietojen välillä .....	101
7.6.2	Vertailut luokittelun perusteella .....	103
8.	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET .....	105
8.1	Tutkimuksen tulokset .....	105
8.2	Jatkotutkimustarpeet .....	107
	LÄHTEET .....	109

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 2.1</b> Ratarakenteen käyttöikä. ....	4
<b>Kuva 3.1</b> Ratarakenteen osat ja niiden nimitykset. (Liikennevirasto 2014, s. 8).....	7
<b>Kuva 3.2</b> Ratakiskon profiili ja osat. (Hyvärinen 2013, s. 10) .....	8
<b>Kuva 3.3</b> Esimerkkikuva kiskonkiinnikkeestä. Kuvassa Hey Back –kiinnike puuratapölkylle (Ratahallintokeskus 2002, s. 47) .....	10
<b>Kuva 3.4</b> Pandrol e-clip kiskonkiinnike betoniratapölkylle. (Wong 21.12.2007).....	11
<b>Kuva 3.5</b> Vasemmalla Vossloh Skl 14 kiskonkiinnike betoniratapölkylle ja oikealla Hey Back -kiskonkiinnike puuratapölkylle. (Rälsbefästningar 31.8.2010).....	11
<b>Kuva 3.6</b> Pystykuormien jakautuminen ratapölkylle ja tukikerrokseen. (Liikennevirasto 2014, s. 30) .....	13
<b>Kuva 3.7</b> Pohjaimen sijainti pölkyn alapinnassa esitetty punaisella. (Buco S.A. 2012).....	14
<b>Kuva 3.8</b> Yksinkertaisen vaihteen osat: tukikiskot (A), kielet (B), vastakiskojen tukikiskot (C), vastakiskot (D), siipikiskot (E) ja kärkikiskot (F). H kuvaa risteyksen matemaattista risteyspistettä. (Liikennevirasto 2012, s. 8) .....	15
<b>Kuva 3.9</b> Ratapenkereessä tapahtuva kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen. (Ehrola 1996, s. 171; muokattu lähteestä Brown 1993) .....	17
<b>Kuva 3.10</b> Veden kulkeutuminen väylärakenteessa. (Isohaka 2014; muokattu lähteestä Doré & Zubeck 2009) .....	25
<b>Kuva 3.11</b> Pohjaveden pinnan korkeuden vaihtelu vuodenajoittain. (Lounais- Suomen ympäristökeskus 2008, viitattu lähteestä Isohaka 2014) .....	27
<b>Kuva 3.12</b> Pyöräkuorman jakautuminen ratarakenteessa. (muokattu lähteestä Esveld 2001, s. 14).....	31
<b>Kuva 3.13</b> Lovipyörän voimakuvaaja. (Lahti 2008, s. 65).....	32
<b>Kuva 3.14</b> Havainnekuva kiskon aaltoilusta. (muokattu lähteestä Vazirani & Chandola 2006, s. 569) .....	34
<b>Kuva 4.1</b> Radantarkastuksessa havaittavat geometriavirheet: a. kallistus, b. kierous, c. korkeuspoikkeama, d. raideleveys (Ratahallintokeskus 2004).....	36
<b>Kuva 4.2</b> Nuolikorkeuspoikkeama (Ratahallintokeskus 2004, s. 10).....	36
<b>Kuva 4.3</b> Raiteentarkastuksen tarkastuskäyrä (Ratahallintokeskus 2005, s. 9).....	37
<b>Kuva 4.4</b> Jäykkyyden jatkuvatoiminen mittalaite Stiffmaster. (Ossi Peltokangas).....	41
<b>Kuva 4.5</b> Jatkuvatoimisen jäykkyyden mittalaitteen toimintaperiaate. (Luomala et al. 2015, s. 13) .....	41
<b>Kuva 4.6</b> Jatkuvatoimisen mittalaitteen testiajot 0,6 kN ja 1,1 kN kuormituksella. (Peltokangas et al. 2013, s. 115) .....	42
<b>Kuva 4.7</b> Tyypillinen maatutkauslaitteisto rataympäristössä. (Silvast & Nurmikolu 2015).....	43

<b>Kuva 4.8</b> Maatutkauksesta saatava tutkakuva. (Silvast & Nurmikolu 2015) .....	44
<b>Kuva 4.9</b> Pohjamaalajeja maaperäkartalla. (GTK) .....	46
<b>Kuva 5.1</b> Väsymissuora ja vuodenaikaisvaihtelut kuormituskestävyydessä. (Ehrola 1996, s. 228) .....	51
<b>Kuva 5.2</b> Saksalaisen alusrakenteen mitoitusmenetelmän diagrammi.(muokattu lähteestä Göbel et al. 1996, s. 186) .....	56
<b>Kuva 6.1</b> Suomessa käytettävä sepelinpuhdistuskone Plasser & Theurer RM 80. Koneen kulkusuunta on kuvassa oikealle. (Ballast Undercutter/Cleaner RM 80) .....	58
<b>Kuva 6.2</b> Ylimpänä lujiteverkko, keskellä lujitekangas ja alimpana yhdistelmälujite. (RT 38675 2015) .....	60
<b>Kuva 6.3</b> Pilaristabilointitapoja olemassa olevalle radalle. (muokattu lähteestä Smekal 2008) .....	61
<b>Kuva 7.1</b> Esimerkkikohteen maaperäkartta (Arcuset al.) .....	65
<b>Kuva 7.2</b> Näkymä tutkimusdatasta Rail Doctor -ohjelmassa. ....	66
<b>Kuva 7.3</b> Tukikerroksen paksuus ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo. ....	68
<b>Kuva 7.4</b> Alusrakennekerroksen paksuus ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo. ....	68
<b>Kuva 7.5</b> Mahdollisen pengertäytteen paksuus ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo. ....	69
<b>Kuva 7.6</b> Alusrakennekerroksen kosteusindeksi ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo. ....	70
<b>Kuva 7.7</b> Pohjamaan kosteusindeksi ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo. ....	71
<b>Kuva 7.8</b> Korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo ja vasen ojasyvyys. ....	71
<b>Kuva 7.9</b> Pohjamaan kosteusindeksi ja alusrakennekerroksen kosteusindeksi. ....	72
<b>Kuva 7.10</b> Alusrakenteen kosteusindeksi ja ojasyvyys. ....	72
<b>Kuva 7.11</b> Pohjamaan kosteusindeksi ja ojasyvyys. ....	73
<b>Kuva 7.12</b> Taipuma ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo .....	74
<b>Kuva 7.13</b> Korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo ja tukikerroksen ikä. ....	75
<b>Kuva 7.14</b> Tukikerroksen paksuus ja taipuma. ....	76
<b>Kuva 7.15</b> Alusrakennekerroksen paksuus ja taipuma. ....	76
<b>Kuva 7.16</b> Pengertäytteen paksuus ja taipuma. ....	77
<b>Kuva 7.17</b> Alusrakenteen kosteusindeksi ja taipuma. ....	78
<b>Kuva 7.18</b> Pohjamaan kosteusindeksi ja taipuma. ....	78
<b>Kuva 7.19</b> Ojasyvyys ja taipuma. ....	79
<b>Kuva 7.20</b> Taipuma ja tukikerroksen ikä. ....	80
<b>Kuva 7.21</b> Korkeuspoikkeaman keskihajonnan muutokset syysmittausten mukaan ratakilometrillä km 87+758,5. ....	81
<b>Kuva 7.22</b> Korkeuspoikkeaman keskihajonnan muutokset syysmittausten mukaan ratakilometrillä km 88+173,5. ....	82
<b>Kuva 7.23</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeudet tutkittavalle rataosalle syysmittauksista. ....	83

<b>Kuva 7.24</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja tukikerroksen paksuus.....	86
<b>Kuva 7.25</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja alusrakennekerroksen paksuus. ....	87
<b>Kuva 7.26</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja pengertäytteen paksuus.....	87
<b>Kuva 7.27</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja alusrakennekerroksen kosteusindeksi.....	88
<b>Kuva 7.28</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja pohjamaan kosteusindeksi. ....	89
<b>Kuva 7.29</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja vasen ojasyvyys. ....	89
<b>Kuva 7.30</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja taipuma.....	90
<b>Kuva 7.31</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja tukikerroksen ikä.....	91
<b>Kuva 7.32</b> Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 5 vuotta.....	94
<b>Kuva 7.33</b> Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 11 vuotta.....	95
<b>Kuva 7.34</b> Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 29 vuotta.....	96
<b>Kuva 7.35</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 5 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 4.....	97
<b>Kuva 7.36</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 11 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 2.....	98
<b>Kuva 7.37</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 25 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 2.....	99
<b>Kuva 7.38</b> Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 29 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 4.....	100

## TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 3.1</b> Pohjamaan luokittelu routivuuden ja kantavuuden mukaan katurakenteilla. (Peltokangas et al. 2013, s. 36 (muokattu lähteestä InfraRYL 2010)).....	21
<b>Taulukko 4.1</b> Korkeuspoikkeaman raja-arvot [mm] 5 metrin mittakannalla (KPO ja KPV). (Ratahallintokeskus 2004).....	37
<b>Taulukko 5.1</b> Pengerleveyden määrittäminen alusrakenneluokissa 2 ja 3. (Liikennevirasto 2014).....	54
<b>Taulukko 5.2</b> Saksalaisessa alusrakenteen mitoitusmenetelmässä vaaditut E-moduulit (minimikantavuus) ja tiivistysasteet uusille ja vanhoille radoille. (muokattu lähteestä Göbel et al. 1996, s. 185).....	55
<b>Taulukko 7.1</b> Hitaan ja nopean korkeuspoikkeaman muutosnopeuden kohteiden vertailu.....	84
<b>Taulukko 7.2</b> Radan luokitteluun käytettävien suureiden luokitteluperusteet. ....	92
<b>Taulukko 7.3</b> Yhteenvetotaulukko lähtötietojen vertailusta. Punaisella merkittyjen ominaisuuksien välillä ei havaittu yhteyttä, vihreällä värillä merkittyjen ominaisuuksien välillä havaittiin yhteys ja keltaisella merkittyjen ominaisuuksien välinen yhteys oli epäselvä. ....	102

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATU	Aukean tilan ulottuma
GEO-luokitus	Suomalainen geotekninen maalajiluokitus
GTK	Geologian tutkimuskeskus
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset
EMMA	Radantarkastusvaunu Ttr1 51
KKL	Kuormituskertaluku
KPV	Korkeuspoikkeama radan vasemmassa kiskossa
PPL	Pudotuspainolaite
RATO/RAMO	Liikenneviraston tai entisen Ratahallintokeskuksen julkaisemat ratatekniset ohjeet
TKA	Ratakuorma-auto
a	Levykuormituslaitteen kuormituspinnan säde 0,15 m
E	Kantavuusmoduuli (MPa)
E <sub>A</sub>	Mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)
E <sub>P</sub>	Mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)
h	Mitoitettavan kerroksen paksuus (m)
k	Vakio, joka riippuu maan Poisson luvun arvosta sekä mittauksessa käytettävän levyn jäykkyydestä
N	Akselin vastaavuuskerroin
N <sub>i</sub>	Vuodenaikojen sallitut kuormituskertaluvut muodonmuutostasolla $\epsilon_i$
n <sub>i</sub>	Vuodenaikajaksojen todelliset kuormituskertaluvut muodonmuutos tasolla $\epsilon_i$
P	Maksimikuormitus (N)
p	Jännitys kosketuspinnassa (kPa)
P <sub>ST</sub>	Standardiakselin paino
P <sub>X</sub>	Akselin X paino
s	Mitattu maksimipainuma (mm)
v	Kestoikä (v)

# 1. JOHDANTO

Suomen olemassa olevan rataverkon kuormituskestävyyssominaisuuksia tunnetaan nykyisellään heikosti, eikä kuormituskestävyyteen perustuvia mitoitustapoja radoille ole. Olemassa olevien ratojen kuormituskestävyyden määrittäminen on vaikeaa puutteellisten lähtötietojen vuoksi. Suomen rataverkko on rakennettu pääosin 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alussa, eikä ratarakenteissa käytetyistä materiaaleista ole tarkkaa tietoa. Vanhoilla radoilla käytetyt materiaalit ovat silmämääräisesti valittuja aineksia radan ympäristöstä, joten niiden kuormituskestävyyssominaisuuksia on vaikea määrittää.

Kehittämällä kuormituskestävyyssmitoitusmenetelmä voidaan ratojen elinkaarikustannuksia alentaa merkittävästi perusparannuksen yhteydessä, kun tarpeellisia parantamistoimenpiteitä osataan kohdistaa oikein. Onnistuneesti kuormituskestävyyssmitoitetulla radalla rakennekerrokset ja koko ratalinja vanhenevat tasaisesti. Olemassa olevalla radalla tavoitteena olisi tasoittaa radan eri komponenttien ja ratalinjan eroja kuormituskestävyydessä. Radan käyttöikä ja seuraavaa perusparannusta on tällöin helpompi suunnitella ja ajoittaa.

Tutkimus rajautuu maanvaraisesti perustettuun, olemassa olevaan Suomen rataverkkoon. Ratarakenteet Suomessa poikkeavat hyvinkin paljon muissa maissa esiintyvistä ratarakenteista ilmastoerojen vuoksi. Suomessa uudet ratapenkereet mitoitetaan ensisijaisesti roudalle, jolloin penkereet ovat paksuja ja kuormituskestävyydeltään yleensä riittäviä. Varsinkin vanhemmilla radoilla penkereiden kuormituskestävyys ei usein kuitenkaan ole tasaista radan eri kohdissa tai radan eri rakenneosien kuormituskestävyys voi olla erilainen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella kuormituskestävyyttä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Pää tavoitteena on muodostaa yleiskäsitys aiheesta pohjaksi myöhemmälle tutkimukselle. Kuormituskestävyyttä käsitteenä ja siihen vaikuttavia tekijöitä käsitellään luvuissa 2 ja 3. Luvussa 4 esitellään olemassa olevalta rataverkolta saatavia lähtötietoaaineistoja kuormituskestävyyssmitoitusta silmällä pitäen. Luvussa 5 pohditaan mahdollisia vaihtoehtoja kuormituskestävyyssmitoituksen lähtökohdaksi. Luvussa 6 esitellään lyhyesti vaihtoehtoja olemassa olevien ratojen kuormituskestävyyden parantamiseksi. Luvussa 7 tutkitaan radan ominaisuuksien yhteyksiä esimerkkikohteessa.

Tutkimus on toteutettu pääasiassa kirjallisuusselvityksenä kotimaisista ja ulkomaisista aineistoista. Viimeisen luvun esimerkkikohteessa yhdistellään saatavilla olevia lähtötietoja esimerkin kohteena olevalta rataosalta. Näiden lähtötietojen avulla pyritään selvittämään, millaisia vaikutussuhteita radan ominaisuuksilla on ja mitä suuria kuormituskestävyyssmitoituksessa on mahdollista hyödyntää sekä suuntaviivoja niiden hyödyntämistavalle.



Ratojen kuormituskestävyyteen liittyvää tutkimusta on tehty Suomessa aiemmin Tampereen teknillisellä yliopistolla. Aiemmat tutkimukset ovat käsitelleet muiden muassa ratojen pystysuuntaista jäykkyyttä (Peltokangas et al. 2013), pengerleveysmitoitusta (Kalliainen & Kolisoja 2013) sekä radan mekaanisen toiminnan mallintamista 3D-menetelmällä (Kalliainen et al. 2014).

## **2. RADAN KUORMITUSKESTÄVYYS**

### **2.1 Mitä on radan kuormituskestävyys?**

Kuormituskestävyydellä tarkoitetaan tämän tutkimuksen yhteydessä ratapenkereen ja pohjamaan kykyä vastustaa raidegeometrian heikkenemisenä ilmenevien pysyvien muodonmuutosten syntymistä toistuvan liikennekuormituksen ja ympäristöolosuhteista aiheutuvan rasituksen yhteisvaikutuksen alaisena. Pysyvillä muodonmuutoksilla tarkoitetaan ratageometriassa tapahtuvaa, palautumatonta muutosta alkuperäisestä tilanteesta. Tässä tutkimuksessa kuormituskestävyyttä tarkastellaan vain maamateriaalien osalta maanvaraisesti perustetussa tilanteessa. Muut rakenneosat, kuten ratapölkyt, kiskot, paa-lulaatat ja sillat, jätetään tutkimuksen ulkopuolelle.

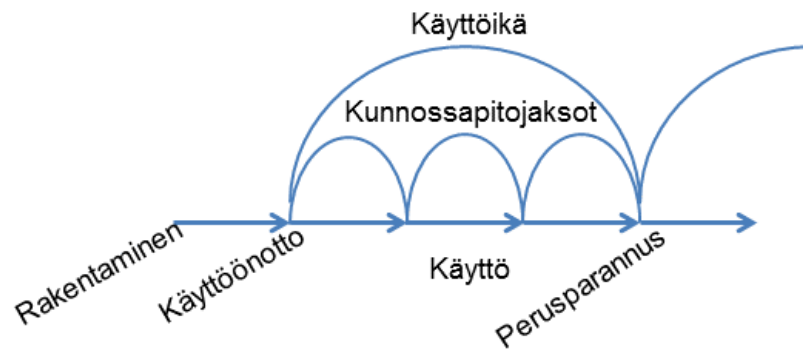
Hyvän kuormituskestävyyden omaavaan rakenteeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia hitaasti. Heikon kuormituskestävyyden omaavaan rakenteeseen taas syntyy pysyviä muodonmuutoksia nopeammin. Ratarakenteen kuormituskestävyys ei ole ajan suhteen vakio. Kuormituskestävyys vaihtelee tyypillisesti vuodenajan mukaan ollen talvella suurimmillaan ja keväällä heikoimmillaan. Myös kosteustilan vaihtelut vaikuttavat kuormituskestävyyden suuruuteen. Kuormituskestävyyden vaihteluun johtavia syitä on käsitelty tarkemmin kappaleissa 3.2.1 ja 3.2.2.

Hyvään ratarakenteen kuormituskestävyyteen vaaditaan hyviä materiaaleja, riittäviä rakennekerrospaksuuksia, hyviä pohjamaan ominaisuuksia sekä toimivaa kuivatusta. Hyvän kuormituskestävyyden saavuttamiseksi ratapenkereen tulisi olla riittävän jäykkä. Raitteessa tulisi silti syntyä riittävä taipuma junan ylityksen yhteydessä, jotta junasta aiheutuvat kuormat jakautuisivat laajemmalle alueelle ratapenkereessä. Kiskon taipumaa ja kuormitusten jakautumista ratapenkereelle käsitellään kappaleissa 3.1.2 ja 3.1.3.

### **2.2 Radan kuormituskestävyyteen liittyviä määritelmiä**

#### **2.2.1 Ratarakenteen käyttöikä**

Käyttöikä kuvaa ratarakenteen ikää, jonka aikana se täyttää ratarakenteelle asetetut vaatimukset (Korkiala-Tanttu et al. 2005, s. 9). Käyttöikäenä voidaan pitää radan elinkaaritaloudellista käyttöaikaa ennen tarvittavaa perusparannusta. Ratarakennetta voidaan käyttää käyttöiän ylittymisen jälkeenkin, mutta käyttö aiheuttaa tällöin lisäkustannuksia. Käyttöikä voi sisältää useita kunnossapitokasjoja, sillä käyttöiän aikana radan kunnossapito on taloudellisesti järkevää. Käyttöiän päätyttyä kunnossapito muuttuu taloudellisesti kannattamattomaksi ja rata vaatii perusparannuksen. Perusparannuksen jälkeen alkaa radan uusi käyttöikäjakso. Käyttöikää on havainnollistettu kuvassa 2.1.



**Kuva 2.1** Ratarakenteen käyttöikä.

Kuormituskestävyyden perusteella ratarakenteelle voidaan määritellä käyttöikä. Käyttöikään vaikuttaa kuormituskestävyyden lisäksi radan liikennemäärä. Radan käyttöikä voidaan ajatella muodossa

$$\text{Radan käyttöikä } (v) = \frac{\text{Radan kuormituskestävyys } (brt)}{\text{Radan liikennemäärä } (brt/v)}, \quad (1)$$

jossa radan kuormituskestävyyden ajatellaan olevan rakenteen ominaisuus, joka on riippumaton kuormituksesta. Rakenteeseen kohdistuvan liikennekuormituksen määrä taas määrittää rakenteen ikääntymisnopeuden ja sen käyttöiän pituuden. Saman ratarakenteen käyttöikä on siten pidempi vähän liikennöidyllä radalla verrattuna tiheästi liikennöityyn rataan, vaikka ratarakenteen kuormituskestävyys olisi molemmissa tapauksissa sama.

Uudella radalla alusrakenteiden käyttöikävaatimus on 100 vuotta (Liikennevirasto 2014a, s. 10).

## 2.2.2 Liikennemäärä

Liikennemäärä kuvaa tarkasteltavalla rataosalla kulkevaa keskimääräistä liikennettä tarkasteltavan ajanjakson aikana (Mäntynen et al. 2012). Liikennemäärä ilmoitetaan rautateillä tyypillisesti yksikössä miljoonaa bruttotonnia (*mbrt*) ja tarkasteltava aikayksikkö on yleensä vuosi. Bruttotonni kuvaa junan veturin ja vaunujen yhteismassaa tonneina (Liikennevirasto 2015, s. 5). Kuormituskestävyyden kannalta liikennemäärän ilmoittaminen bruttotonneina ei anna riittävää kuvaa radan liikennöinnistä ja käytettävästä kalustosta. Liikennemäärä ei myöskään huomioi radalla ilmeneviä dynaamisia kuormia, jotka voivat aiheutua esimerkiksi kalustovirheistä. Henkilö- ja tavaraliikenteen junat aiheuttavat radalle erilaisen kuormitusvaikutuksen, sillä esimerkiksi niiden akselipainot ja käytetyt nopeudet ovat erilaiset. Tavaraliikenteessä akselipainot voivat olla selvästi suurempia henkilöjunaan verrattuna. Henkilöjunille sallitut liikennenopeudet taas ovat monin paikoin

suuremmat kuin tavarajunille, jolloin henkilöjunien pyöräkuormat aiheuttavat ratarakenteeseen nopeamman kuormitusylikin kuin hitaampi tavaraliikenne.

Sama ongelma liikennekuormituksen määrittämisessä ilmenee myös tieliikenteessä. Tieliikenteessä onkin määritetty kuormitusvastaavuuskertoimia, joiden avulla eri ajoneuvotyyppit voidaan suhteuttaa standardiakselipainoon. Kuormitusvastaavuuskertoimen määrittämiseen käytetään usein niin sanottua neljännen potenssin sääntöä (Ehrola 1996)

$$N = \left( \frac{P_X}{P_{ST}} \right)^4, \quad (2)$$

jossa

$N$  on akselin vastaavuuskerroin

$P_X$  on akselin  $X$  paino

$P_{ST}$  on standardiakselin paino.

Ajoneuvon kuormitusvastaavuuskerroin saadaan summaamalla ajoneuvon kaikkien akselien  $X_1 \dots X_n$  vastaavuuskertoimet. Suomessa käytettävä standardiakselipaino on 100 kN, josta saadaan esimerkiksi henkilö- ja pakettiauton aiheuttama kuormitus käyttämällä kuormitusvastaavuuskerrointa 0,0003. (Ehrola 1996). Vuonna 1999 käyttöön otettujen, uusien kuormitusvastaavuuskertoimien perusteella perävaunullisen kuorma-auton kerroin on keskimäärin 3,2, joten henkilö- ja pakettiautojen aiheuttamaa kuormitusta voidaan pitää lähes mitättömänä raskaiden kuorma-autojen aiheuttamiin rasituksiin verrattuna. Kuormitusvastaavuuskertoimet on määritetty akselimassatutkimusten perusteella. (Pihlajamäki 2001, s. 9-10)

Tieliikenteessä kuormitusvastaavuuskertoimien avulla voidaan määrittää kuormituskertaluku. Kuormituskertaluku (KKL) ilmoittaa tarkasteltavan tieosuuden kokonaiskuormituksen mitoitusajanjakson aikana. Kuormituskertaluku ilmoitetaan standardiakselin suurien kuormitusten lukumääränä. Koska tulevaisuuden liikenteen määrää ja koostumusta on vaikea arvioida, on kuormituskertaluku karkea arvio nykytilanteen ja mitoitusajanjakson ennusteiden pohjalta. Tieliikenteen kuormituskertaluku ottaa huomioon mitoitusjakson pituuden, tien leveyden, keskivuorokausiliikenteen määrän mitoitusajanjakson alussa ja lopussa sekä ajoneuvoryhmän vastaavuuskertoimen. (Ehrola 1996)

Radoille vastaavia kuormitusvastaavuuskertoimia tai kuormituskertalukujen laskentatapoja ei ole määritetty. Niiden määrittäminen auttaisi liikennekuormitusten arvioinnissa. Kuormitusvastaavuuskertoimissa tulisi huomioida erilaisten akselipainojen lisäksi esimerkiksi ajonopeudet ja kalusto-ominaisuudet.

## 2.3 Heikon kuormituskestävyyden ilmenemismuodot

Heikko kuormituskestävyys voi ilmetä radoilla monin tavoin kaikissa ratapenkereen osissa. Heikko kuormituskestävyys alentaa rakenteen kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia, mikä ilmenee radan geometrian heikkenemisenä.

Tukikerroksen hienoneminen ja materiaalipartikkelien uudelleen järjestyminen johtaa tukikerroksen tiivistymiseen ja raiteen painumaan (Kolisoja et al. 1999, s. 125). Tiivistyminen näkyy esimerkiksi raiteen geometrian heikkenemisenä ja roikkuvina pölkkyinä, jotka lisäävät tukikerroksen tukemistarvetta. Tukikerroksen tukeminen osaltaan hienontaa tukikerroksen materiaalia edelleen, jolloin tapahtuu taas tiivistymistä. Tukikerrosmaateriaalin hienontuminen voi muuttaa myös ratapenkereen kuivatusominaisuuksia ja kosteustilaa, jotka edistävät esimerkiksi routavaurioiden syntymistä.

Ratarakenteen tiivistymistä tapahtuu myös muissa rakennekerroksissa. Junakuormat aiheuttavat rakennekerrosten maapartikkelien uudelleenjärjestäytymistä, mikä havaitaan esimerkiksi radan painumana. Rataan kohdistuvat kuormitukset voivat saada rakennekerrosmaateriaalin kulkeutumaan sivusuunnassa pois kuormitusten alta. Tämä kulkeutuminen voidaan havaita ratapenkereen leviämisenä. (Kolisoja et al. 1999, s. 125)

Pohjamaassa tapahtuvat deformaatiot vaikuttavat koko ratapenkereeseen. Ratapenkerestä ja junaliikenteestä aiheutuu kuormitusta pohjamaalle, jolloin pohjamaahan voi syntyä pysyviä muodonmuutoksia. Pohjamaan painuminen aiheuttaa koko ratapenkereen painumisen ja pohjamaassa tapahtuvat leikkausmuodonmuutokset voivat olla kriittisiä ratapenkereen stabiliteetille. Pohjamaassa tapahtuvat muodonmuutokset ovat oleellisempia pehmeillä pohjamailla. (Kolisoja et al. 1999, s. 125)

## 2.4 Kuormituskestävyyssmitoituksen hyödyt

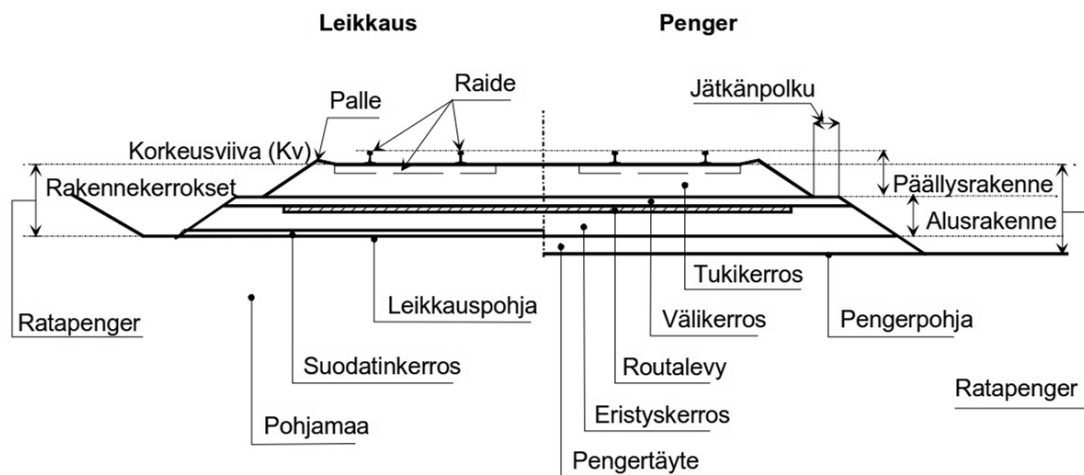
Toimivalla ratojen kuormituskestävyyssmitoituksella voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä radan elinkaaren aikana. Kuormituskestävyyssmitoituksella pyritään mitoittamaan radan komponentit niin, että koko ratalinja ikääntyy samaa tahtia. Radan komponenttien yhtäaikaaisella vanhenemisella vältetään radan pistemäiseltä korjaamiselta kesken käyttöön. Perusparannuksen ajankohta on helpompi määrittää, kun ikääntyminen on tasaista eri rakenneosien kesken. Perusparannuksen yhteydessä voidaan korjata tai vaihtaa kaikki rakenneosat. Perusparannuksen jälkeen alkaa radan uusi käyttöikä, joka niin ikään pyritään mitoittamaan kuormituskestävyydelle ja samanaikaiselle vanhenemiselle. Kuormituskestävyyssmitoituksella on mahdollista alentaa elinkaarikustannuksia, kun korjaustöiden piteet osataan kohdentaa ja ajoittaa oikein.

### 3. RADAN KUORMITUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

#### 3.1 Ratarakenne

##### 3.1.1 Ratarakenteen osat

Ratarakenne ja sen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi radan kuormituskestävyyteen. Uuden ratarakenteen osat ja nimitykset on esitetty kuvassa 3.1 nykyisten suunnitteluperusteiden mukaisesti. Vanhat ratarakenteet ovat periaatteeltaan hyvin samankaltaisia, mutta ne voivat erota huomattavasti nykyohjeiden mukaan rakennetuista radoista etenkin rakennekerroksissa käytettyjen materiaalien osalta. Rakentamisen jälkeen tehdyt parantamistoimenpiteet ovat myös voineet muuttaa ratarakennetta alkuperäisestä tilanteesta poikkeavaksi.



**Kuva 3.1** Ratarakenteen osat ja niiden nimitykset. (Liikennevirasto 2014a, s. 8)

Ratarakenne koostuu useasta osasta. Ylin osa on raide, joka muodostuu kiskoista, kiskonkiinnikkeistä ja pölkyistä. Radan päällysrakenne sisältää raiteen lisäksi tukikerroksen. Alusrakenne kattaa väli- ja eristyskerroksen sekä mahdollisen suodatinkerroksen ja routalevyt. Tukikerros, alusrakenne sekä mahdolliset suodatinkerrokset ja pengertäytteet muodostavat ratapenkereen. Ratapenkereen alla on pohjamaa. Ratarakenteiden tehtävänä on jakaa junaliikenteestä aiheutuvat kuormat pohjamaalle. (Liikennevirasto 2014a, s. 6-8).

Tässä tutkimuksessa nämä radan rakenneosat on jaettu raiteeseen, ratapenkereeseen ja pohjamaan. Tutkimus keskittyy ratapenkereen ja pohjamaan vaikutukseen kuormitus-

kestävyyteen, mutta kuormituskestävyyden ymmärtämisen kannalta on tärkeää huomioida myös raiteen ominaisuudet ja raiteen osien vaikutus radan kokonaiskuormituskestävyyteen.

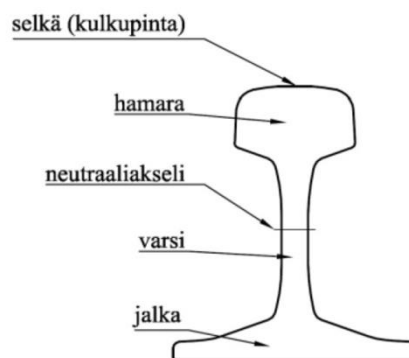
Radat luokitellaan Suomessa sekä päällysy- että alusrakenneluokkiin. Päällysy- eli rataluokkaan A–C vaikuttavat kiskotus ja tukikerrosmateriaali (Ratahallintokeskus 1995, s. 5). Rataluokan perusteella radalle määritetään suurin sallittu akselipaino sekä suurin sallittu nopeus henkilö- ja tavaraliikenteelle. Alusrakenneluokka 0–4 määrittyy liikennetyypin, akselipainon ja nopeuden perusteella (Liikennevirasto 2014a, s. 15).

### 3.1.2 Raide

Raide koostuu ratakiskoista, kiskonkiinnityksistä, kiskon jatkososista, ratapölkyistä sekä muista erikoisrakenteista, kuten vaihteista (Liikennevirasto 2014a, s. 7). Raiteen ominaisuudet ja toimivuus vaikuttavat merkittävästi liikennekuormien jakautumiseen ratapenkereellä. Toisaalta myös alemmissa radan rakennekerroksissa esiintyvät ongelmat esimerkiksi kuormituskestävyydessä heijastuvat raiteeseen ja edelleen radalla liikennöivään kalustoon.

### Kiskot

Ratakiskot ovat ratarakenteen ylin osa. Ne ovat suorassa kosketuksessa niitä pitkin kulkevan junan pyöriin ja mahdollistavat junan kulkemisen radalla. Raiteissa käytetään yleensä Vignole-kiskoprofiilia, joka on esitetty kuvassa 3.2. Muita kiskoprofiileita käytetään esimerkiksi kuormausalueilla. (Ratahallintokeskus 2002, s. 33)



**Kuva 3.2** Ratakiskon profiili ja osat. (Hyvärinen 2013, s. 10)

Junan pyörä kulkee kiskon selällä eli kulkupinnalla. Junasta aiheutuvat kuormat kulkeutuvat hamaran, varren ja jalan kautta kiskonkiinnityksille, ratapölkyille ja edelleen syvemmälle ratarakenteisiin.

Ratakiskot valmistetaan teräksestä. Suomen rataverkolla on käytössä useita kiskoprofiileja, jotka eroavat toisistaan poikkileikkauksensa ja painonsa johdosta. Suomen päärataverkolla käytettävät kiskot ovat pääasiassa kiskoja 54 E1 tai 60 E1, mutta rataverkolta löytyy myös muita kiskoprofiileita alemman päällysrakenneluokan radoilta. (Liikennevirasto 2013b, s. 10-11; Ratahallintokeskus 2002, s. 33-34)

Kiskot voidaan hitsata jatkuviksi, jolloin puhutaan jatkuvakiskoraiteista. Jatkuvakiskoraiteiden kiskonpituus on yli 300 m. Lyhytkiskoraiteen kiskon pituus on alle 25 m. Pitkäkiskoraiteen kiskon pituus on yli 25 m, mutta alle 50 m. (Ratahallintokeskus 2002, s. 5). Suomessa pääradat ovat jatkuvakiskoraiteita, sillä kiskon hitsaaminen jatkuvaksi mahdollistaa suurempien nopeuksien käyttämisen kuin lyhyt- ja pitkäkiskoraiteet (Ratahallintokeskus 1998, s. 7).

Jatkuvakiskoraiteita suositellaan käytettäväksi kaikilla betonipölkkyraiteilla sekä raiteilla, joilla liikenteen nopeus on yli 50 km/h tai raiteella on erityisen raskasta tavaraliikennettä. Lyhytkiskoraidetta käytetään vähäliikenteisillä radoilla, joilla liikenteen nopeus on alle 120 km/h, tukikerros on materiaaliltaan soraa tai jolla esiintyy painumia, jotka olisivat haitallisia jatkuvakiskoraiteelle. Pitkäkiskoraidetta käytetään vain poikkeustapauksissa, esimerkiksi silloilla, joilla pyritään vähentämään silloille kohdistuvaa sysäyskuormaa (Ratahallintokeskus 2002, s. 9-10).

Kiskojen kuluminen on melko tasaista. Epätasaisesta kulumisesta johtuvia epäjatkuvuuksia kuormituskestävyyden suhteen ei synny kiskossa (Tuominen 2004, s. 35). Kaarteessa ulko- ja sisäkiskon kuluminen on kuitenkin erilaista (Lichtberger 2005, s. 122). Kiskojen liitoskohdissa raiteeseen kuitenkin syntyy epäjatkuvuuskohta raidetyypistä riippumatta. Jatkuvakiskoraiteessa kiskojen hitsikohdat ovat tyypillisesti kiskon heikoin osa ja niihin muodostuu herkästi epäjatkuvuuskohtia, joissa radan jousto tyypillisesti kasvaa. Kiskojen epäjatkuvuudet aiheuttavat dynaamisten kuormien kasvua.

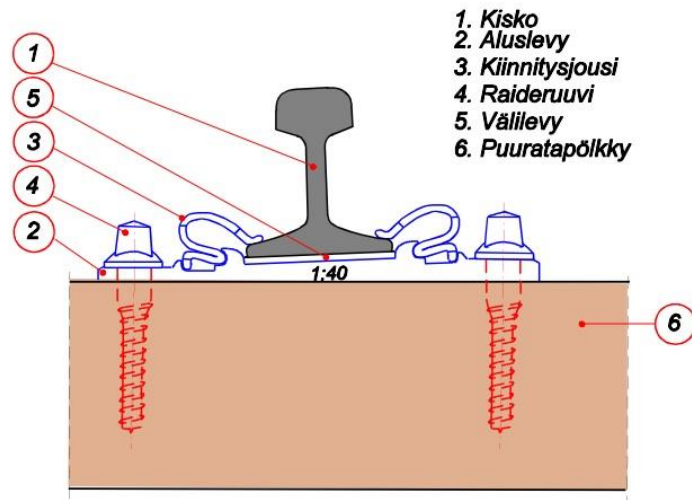
Lämpötilan muutokset vaikuttavat kiskoisiin. Kuumalla ilmalla ja auringonpaisteissa kiskot lämpenevät. Korkea lämpötila aiheuttaa lämpölaajenemista, josta puolestaan aiheutuu puristusjännitystä kiskoissa. Kylmällä ilmalla kiskot puolestaan kutistuvat ja niihin syntyy vetojännitystä. Suomen radat ovat nykyään pääasiassa jatkuvakiskoraiteita, joilla lämpötilamuutoksista johtuvat pituusmuutokset estetään kiinnittämällä kiskot tiukasti ratapölkkyihin kiskonkiinnikkeillä. (Esveld 2001, s. 61; Lichtberger 2005, s. 147-150)

## **Kiskonkiinnikkeet**

Kiskonkiinnikkeiden tehtävä on kiinnittää kiskot ratapölkkyihin niin, että ne pysyvät paikoillaan ja mahdollistavat radan liikennöinnin. Kiskonkiinnikkeet siirtävät junan aiheuttamia kuormia edelleen ratapölkkyille. (Ratahallintokeskus 2002, s. 45). Periaatekuva kis-



konkiinnikkeestä on esitetty kuvassa 3.3. Kiskonkiinnikkeet ja tarvittaessa aluslevy kiinnitetään ratapölkkyyn raideruuvilla (4). Kiinnitysjousella (3) kisko ja mahdolliset alus- ja välilevyt puristetaan kiinni ratapölkkyyn.

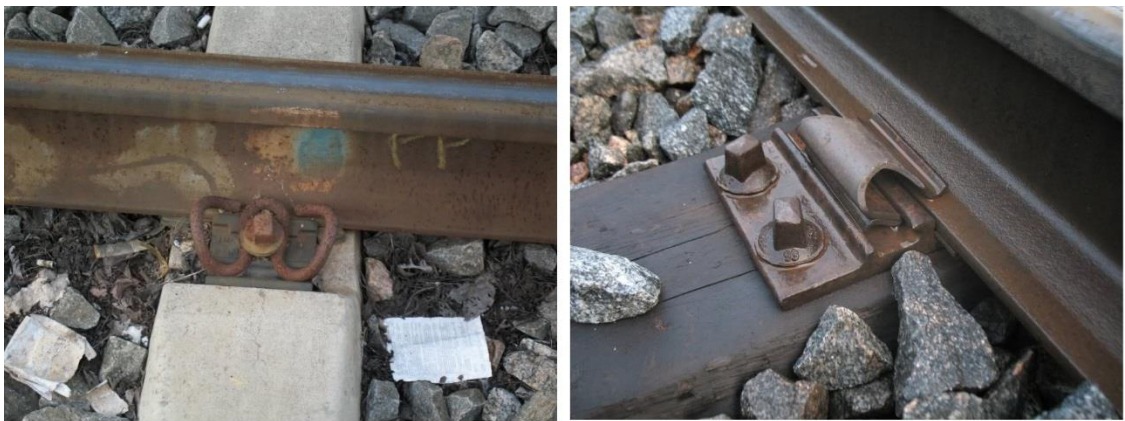


**Kuva 3.3** Esimerkkikuva kiskonkiinnikkeestä. Kuvassa Hey Back –kiinnike puuratapölkylle (Ratahallintokeskus 2002, s. 47)

Kiskon kiinnikkeiden tarkoitus on myös estää kiskon lämpölaajeneminen, kaatuminen ja liikkuminen niin pysty-, pituus- kuin poikkisuunnassa (Selig & Waters 1994, s. 2.3). Kiskonkiinnikkeiltä vaaditaan suurta läpiveto- ja vääntövastusta. Suomessa käytettävät kiskonkiinnikkeet ovat pääasiassa Vossloh Skl 14 - ja Pandrol e-clip -kiinnikkeitä betonisilla ratapölkkyillä tai Hey Back -kiinnityksiä puuratapölkkyillä. Nämä kiinniketyypit on esitetty kuvissa 3.4 ja 3.5. Puuratapölkkyillä voidaan käyttää myös suoraa raideruuvikiinnitystä tai ratanaulakiinnitystä. Kiskonkiinnikkeet voivat vaatia aluslevyn, jonka avulla kiskonkiinnikkeet liitetään ratapölkkyyn. Kuvassa 3.3 aluslevy on merkitty numerolla 2. Aluslevyjä ei tyypillisesti käytetä betoniratapölkkyillä. Aluslevy asennetaan ratapölkyn pintaan ja kisko ja kiskonkiinnikkeet asetetaan aluslevyn päälle. Aluslevyt antavat kiskoille tarvittavan kallistuksen ja auttavat jakamaan pyöräkuormat tasaisemmin pölkylle. Aluslevyt voidaan esiasentaa jo pölkyn valmistusvaiheessa. (Ratahallintokeskus 2002, s. 45)



**Kuva 3.4** Pandrol e-clip kiskonkiinnike betoniratapölkylle. (Wong 21.12.2007)



**Kuva 3.5** Vasemmalla Vossloh Skl 14 kiskonkiinnike betoniratapölkylle ja oikealla Hey Back -kiskonkiinnike puuratapölkylle. (Rälsbefästningar 31.8.2010)

## Välilevyt

Välilevy on joustavasta materiaalista valmistettu levy, joka asennetaan kiskon ja ratapölkyn väliin kiskon alle. Välilevyn tehtävä on jakaa kiskoilta tulevat kuormat useammille pölkkyille ja pidentää pölkkyjen käyttöikää sekä vaimentaa junaliikenteestä syntyviä korkeita taajuuksia, mikä pienentää melu- ja värinähaittoja. Välilevy lisää läpivetovastusta kiskonkiinnityksessä. (Luomala et al. 2015, s. 54; Ratahallintokeskus 2002, s. 45). Välilevyn sijainti on esitetty aiemmin kuvassa 3.3 numerolla 5.

Välilevyn ominaisuudet vaikuttavat osaltaan radan kokonaiskuormituskestävyyteen. Välilevyssä tapahtuva jousto mahdollistaa junakuorman jakautumisen useammalle pölkylle, jolloin pölkkyjen alapuolisille rakenteille kohdistuvat kuormat ovat pienempiä.

## Ratapölkyt

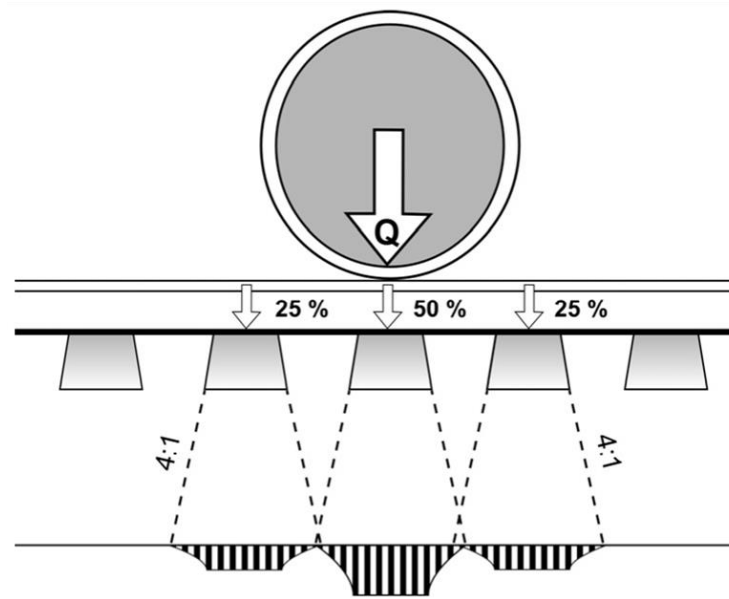
Ratapölkyt ovat puusta, betonista tai muusta materiaalista valmistettuja palkkeja, joihin kiskot kiinnitetään kiskonkiinnikkeillä. Ratapölkyt lepäävät tukikerroksen päällä. Ratapölkkyjen tehtävä on vastaanottaa kiskoilta tulevat junakuormat ja siirtää ne edelleen

mahdollisimman tasaisesti tukikerrokseen. Ratapölkkyt myös jäykistävät raidetta sekä pituus- että poikittaissuunnassa ja auttavat sähköisen eristyksen luomisessa kiskojen ja tukikerroksen välille. Ratapölkkytyyppejä ovat esimerkiksi yksi- ja kaksiosaiset ratapölkkyt, leveät ratapölkkyt sekä kehäpölkkyt (Ratahallintokeskus 2002, s. 19; Esveld 2001, s. 212; Rantala et al. 2013, s. 16-19)

Suomen rataverkolla käytetään pääasiassa yksiosaisia betoni- ja mäntypuuratapölkkyjä. Betoniratapölkkyjä käytetään sepeliraiteilla ja puuratapölkkyjä sekä sora- että sepeliraiteilla. Betoniratapölkkyjen paino metrille on noin 2,5 kertaa suurempi kuin puupölkkyillä, mikä tekee betonipölkkyistä vaikeampia käsitellä, mutta suuremman massansa ansiosta betonipölkkyt pysyvät paremmin paikoillaan. Lisäksi betonipölkkyjen muotoilu vastustaa liikettä tukikerroksessa ja pitää pölkyn paremmin paikoillaan. Betoniratapölkkyraiteen sivuttaisvastus on 50–80 % suurempi kuin puupölkkyraiteella. (Ratahallintokeskus 2002, s. 19-20)

Puuratapölkkyjen etu on niiden suurempi elastisuus, mikä sallii stabiliteettiongelmia ja epätasaisempia painumia ratarakenteessa kuin betoniratapölkkyt. Betoniratapölkkyt tukikerrokselle välittyvät kuormat ja jännitykset saattavat olla jopa 25 % suuremmat kuin puuratapölkkyraiteella. Betoniratapölkkyt vaativat myös paksumman tukikerrosrakenteen kuin puuratapölkkyt. Betoniratapölkkyjen käyttöikätaavoite on 40 vuotta vuoden 1982 jälkeen valmistetuille ratapölkkyille, kun käyttöikätaavoite puuratapölkkyille on 30 vuotta. (Ratahallintokeskus 2002, s. 19-20; Esveld 2001, s. 212-214)

Kuormituskestävyyden kannalta ratapölkkyillä on suuri merkitys. Ratapölkkyjen ominaisuudet määrittelevät suurelta osin sen, miten junaliikenteestä aiheutuvat kuormat siirtyvät ja jakaantuvat ratapenkereeseen. Rataan kohdistuvien pystykuormien oletetaan RATO (Ratatekniset ohjeet) osan 3 mukaan jakautuvat kuvan 3.6 mukaisesti ratapölkkyille ja edelleen tukikerrokseen. Puolet junan pyörästä kiskoon kohdistuvasta pystysuuntaisesta voimasta kohdistuu pyörän alla olevalle ratapölkkyille. Kiskon ja radan taipumisesta johtuen viereisille ratapölkkyille kohdistuu 25 % molemmille. Pyöräkuormien jakautumisesta ratapölkkyille on myös muita versioita, sillä kuormien jakautuminen riippuu esimerkiksi pohjamaan jäykkyydestä ja ratapenkereen paksuudesta (Rantala et al. 2013, s. 38-39; Lichtberger 2005, s. 203). Jäykässä ratarakenteessa kuormat kohdistuvat vain lähimmille pölkkyille pyöräkuorman alla, kun taas joustavammalla radalla kuormat jakautuvat useammalle pölkkyille. Pölkkyyn ja edelleen tukikerrokseen kohdistuvat kuormat ovat siis sitä suuremmat, mitä jäykempi rata on.



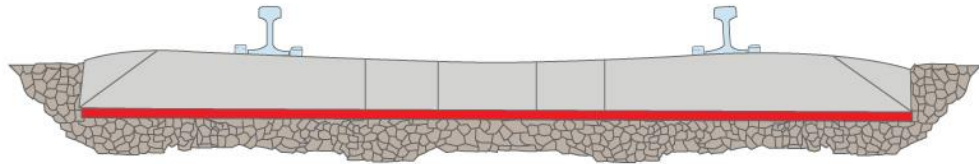
**Kuva 3.6** Pystykuormien jakautuminen ratapölkyille ja tukikerrokseen. (Liikennevirasto 2014a, s. 30)

Ratapölkkyjen tuentatila vaikuttaa suuresti kuormien jakautumiseen ja pölkkyjen vaurioitumiseen. Optimaalisessa tilanteessa ratapölkkyt kantavat vain päätyosillaan kiskojen alla (Esvelde 2001, s. 212). Ratapölkkyjen tuentatila ei kuitenkaan aina ole optimaalinen, vaan ratapölkkyt voivat alkaa kantaa keskiosallaan tai ne voivat olla täysin tukeutumattomia. Kuormitusten toistuvuus radalla aiheuttaa ratarakenteiden painumista ja hienonemista, josta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.1.3. Mikäli nämä muodonmuutokset ovat epätasaisia, osa ratapölkkyistä voi ajan myötä muuttua tukeutumattomiksi, eli ne alkavat roikkua kiskojen varassa koskematta lainkaan tukikerrokseen. Tällöin pölkyn ja tukikerroksen väliin jää tyhjättilaa, eikä pölkky siirrä kuormia optimaalisesti tukikerrokseen. Tämä aiheuttaa kuormitusten kasvua viereisillä pölkyillä. (Lundqvist & Dahlberg 2005). Junan ylityksen yhteydessä tukeutumattomat pölkkyt iskeytyvät tukikerrosta vasten, mikä lisää tukikerroksen hienonemista ja voi aiheuttaa pumppautumiseffektin, jonka syntymisestä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.3.2.

Ratapölkkyt voivat vaurioitua useista eri syistä. Huonosta tuentatilanteesta johtuen ratapölkkyt voivat alkaa kantaa myös keskiosallaan, mikä voi aiheuttaa betonisen ratapölkyn vaurioitumisen esimerkiksi halkeilemalla. Betoniset ratapölkkyt voivat vaurioitua myös pakkasesta aiheutuvalla rapautumisella. Puisten ratapölkkyjen vaurioitumismekanismit ovat puun lahoaminen, pölkyn päiden halkeilu sekä aluslevyn painuminen ratapölkkyyn. (Lichtberger 2005, s. 170; Rantala et al. 2013)

## Pohjaimet

Pohjain on ratapölkyn alapintaan valmistus- tai asennusvaiheessa asennettava elastinen matto tai joustomassa. Pohjaimia voidaan valmistaa esimerkiksi luonnonkumista, polyuretaanista, korkkikumista tai etyyli-vinyyli-asetaatista. (UIC 2009; Kalliainen et al. 2014, s. 16). Periaatekuva pohjaimen sijainnista ratarakenteessa on esitetty kuvassa 3.7.



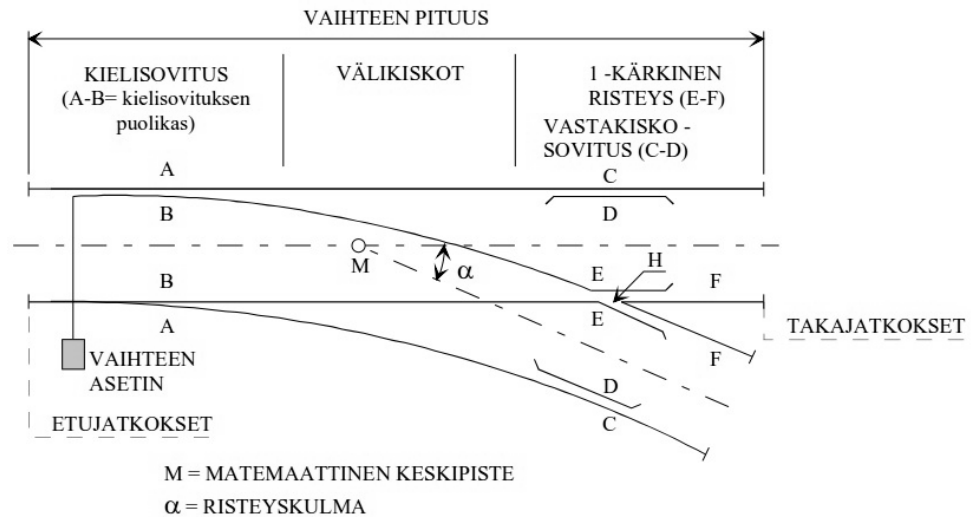
**Kuva 3.7** Pohjaimen sijainti pölkyn alapinnassa esitetty punaisella. (Buco S.A. 2012)

Pohjaimia käytetään betoniratapölkkyillä ja betonisilla vaihdepölkkyillä parantamaan raidegeometrian säilymistä ja lisäämään ratapölkyn joustavuutta. Pohjaimen avulla voidaan vähentää ratapölkyn alapinnan kulumista, tukikerroksen hienonemista sekä kiskoon ja pölkkyyn kohdistuvia kuormituksia. Pohjaimia käyttämällä voidaan lisäksi pidentää raiteen tukemisväliä, vähentää runkomelua ja ohentaa tukikerrosta. (UIC 2009; Luomala et al. 2015, s. 62)

Myös pohjaimet vaikuttavat ratarakenteen kuormituskestävyyteen. Joustavat pohjaimet kasvattavat pölkkyjen ja tukikerroksen kontaktipinta-alaa, mikä pienentää kuormia sekä pölkkyssä että tukikerroksessa suhteessa niiden pinta-alaan. Pohjaimen käyttäminen vähentää näin tukikerroksen jauhautumista, mikä kasvattaa kuormituskestävyyttä ja rakenteen käyttöikää. (Luomala et al. 2015, s. 68)

## Vaihteet

Vaihteet mahdollistavat liikenteen siirtymisen raiteelta toiselle tai kahden raiteen risteämisen ilman mahdollisuutta raiteen vaihtamiselle. Vaihteet ovat rautateiden erikoisrakenteita, jotka aiheuttavat epäjatkuvuuskohtia ratarakenteeseen. (Varis 2014). Yksinkertaisen vaihteen rakenne on kuvattu kuvassa 3.8. Kuvassa on esitetty tukikiskot (A), kielet (B), vastakiskojen tukikiskot (C), vastakiskot (D), siipikiskot (E) ja kärkikiskot (F). M kuvaa vaihteen matemaattista keskipistettä, H kuvaa risteuksen matemaattista risteyspistettä ja  $\alpha$  vaihteen risteyskulmaa. (Liikennevirasto 2012b, s. 8)



**Kuva 3.8** Yksinkertaisen vaihteen osat: tukikiskot (A), kielet (B), vastakiskojen tukikiskot (C), vastakiskot (D), siipikiskot (E) ja kärkikiskot (F). H kuvaa risteyksen matemaattista risteyspistettä. (Liikennevirasto 2012b, s. 8)

Vaihteet asennetaan radalle vaihde-elementteinä, joihin on asennettu pölkkyjen ja kisko-  
jen lisäksi myös tarvittavat laitteet, kuten kääntölaitteet ja asettimet (Nummelin 2004, s.  
100). Vaihde-elementissä käytetään normaalia pidempiä ratapölkkyjä, jotka vaikuttavat  
raiteen ominaisuuksiin muuttamalla esimerkiksi radan jousto-ominaisuuksia. Jäykkyyden  
muutos aiheuttaa radassa epäjatkuvuuskohdan. Epäjatkuvuuksia syntyy myös kielistä ja  
kärjistä, kiskon jatkoskohdista sekä vaihteen jyrkistä kaarteista, sillä vaihteissa ei yleensä  
käytetä siirtymäkaaria tai kallistuksia. Siirtyminen tukikiskolta kielelle ja kärkikiskolle  
tai päinvastoin aiheuttaa epäjatkuvuuden. (Zwanenburg 2009, s. 35)

Vaihteen aiheuttama epäjatkuvuuskohta aiheuttaa dynaamisen kuormituspiikin, joka tois-  
tuu jokaisella pyöräkerran ylityksellä (Varis 2014, s. 56). Tämä aiheuttaa esimerkiksi tu-  
kikerroksen hienonemista ja tiivistymistä, mistä taas aiheutuu raidegeometrian heikkene-  
minen. Vaihteen geometria huononeekin tyypillisesti nopeammin kuin muualla ratalin-  
jalla. Geometristen ominaisuuksiensa ja laitteidensa vuoksi vaihteen tukeminen on haas-  
tavampaa ja vaatii oman tukemiskoneensa (Peltokangas & Nurmikolu 2015, s. 79).

Tässä tutkimuksessa vaihteet rajataan tutkimusalueen ulkopuolelle niiden erikoisluonteen  
vuoksi.

### 3.1.3 Ratapenger

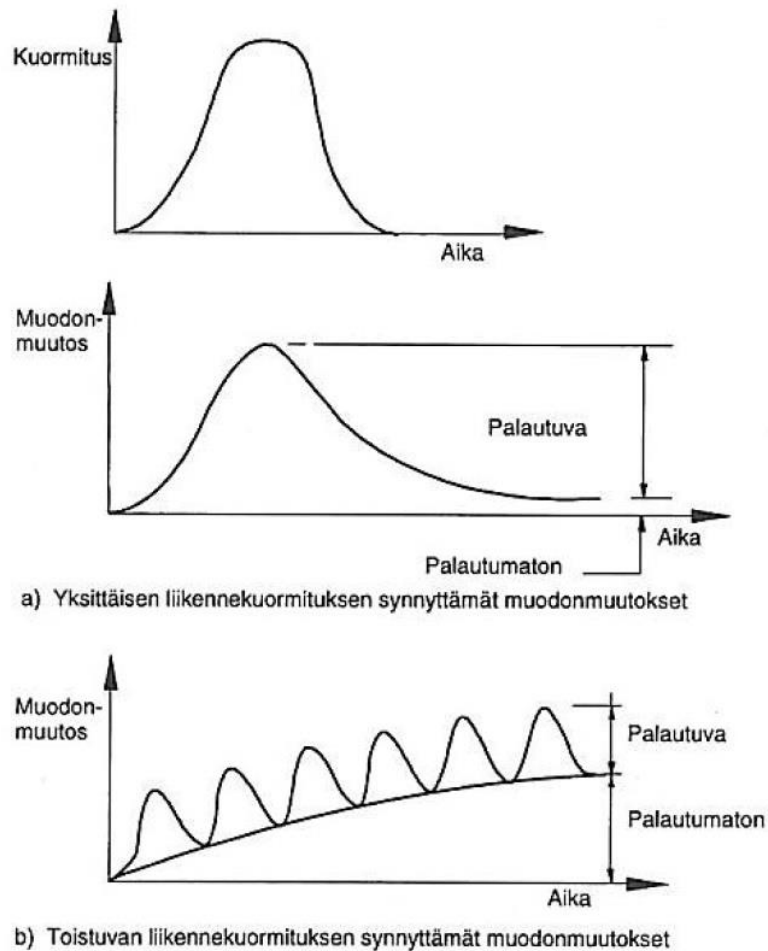
Ratapenger koostuu tukikerroksesta, välikerroksesta ja eristyskerroksesta. Näiden lisäksi  
ratapengerkoneessa voi olla suodatinkerros tai pengertäytettä. Ratarakenteessa voidaan käyt-  
tää routalevyjä tarpeen vaatiessa väli- ja eristyskerroksen välissä. Ratapenger rakennetaan  
pohjamaan päälle. Pohjamaa toimii alustana raiteelle. (Liikennevirasto 2014a). Ratapen-  
gerin osien nimityksiä on esitetty aiemmin kuvassa 3.1. Nykyisin ratapenger mitoitetaan

Suomessa routamitoituksella, jolla saadaan käytännössä riittävät rakennepaksuudet myös kuormituskestävyyttä ajatellen (Kalliainen et al. 2011, s. 26).

Ratapenger on kriittinen tekijä ratarakenteen kuormituskestävyyden muodostumisessa. Sekä ratapenkereen geometria että rakennekerrosmateriaalit ja niiden ominaisuudet vaikuttavat ratarakenteen toimintaan. Ratapenkereen kuormituskestävyyttä voidaan arvioida suuntaa-antavasti esimerkiksi kantavuuden perusteella. Kantavuus taas on riippuvainen rakennekerrosten jäykkyydestä ja tiiveydestä. (Peltokangas et al. 2013; Luomala et al. 2015)

Ratapenkereen jäykkyyden voidaan olettaa kuvaavan ratapenkereen kuormituskestävyyttä ainakin suuntaa-antavasti. Mitä jäykempi ratapenger on, sitä pienempiä palautuvia muodonmuutoksia siinä tapahtuu liikennekuorman vaikutuksesta. Pienemmät palautuvat painumat taas indikoivat pienempiä ja hitaammin ilmeneviä pysyviä muodonmuutoksia. Toisaalta hyvin jäykkä ratapenger vähentää raiteen taipumaa junan pyöräkuorman alla, jolloin pyöräkuormat eivät jakaudu yhtä tasaisesti ratarakenteeseen, vaan kohdistuvat suurelta osin pyörän alla olevaan pölkkyy. Kuormituskestävyyden kannalta ihanteellinen ratarakenne olisikin jäykkä ratapenger ja riittävän joustava raide, joka jakaa pyöräkuormitukset useammalle pölkylle. Kiskon taipuma voidaan mahdollistaa joustavilla välilevyillä ja pohjaimilla.

Ratapenkereen yleistä kuormitus-muodonmuutoskäyttäytymistä on esitelty kuvassa 3.9. Yksittäisen liikennekuormituksen yhteydessä ratapenkereessä tapahtuu muodonmuutoksia kohdan a mukaisesti. Suurin osa muodonmuutoksista on palautuvaa muodonmuutosta, joka pyrkii palautumaan kuormituksen poistuttua. Pieni osa muodonmuutoksesta on kuitenkin pysyvää muodonmuutosta, joten ratapenger ei palaudu täysin samanlaiseen tilaan kuin ennen kuormitusta. Liikennekuormien toistuessa alkavat pysyvät muodonmuutokset kumuloitua, kuten kohdassa b on esitetty. (Ehrola 1996, s. 170-171; Kalliainen & Kolisoja 2013, s. 15-16)



**Kuva 3.9** Ratapenkereessä tapahtuva kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen. (Ehrola 1996, s. 171; muokattu lähteestä Brown 1993)

Materiaalit, joista ratapenger tulee rakentaa, ovat tarkasti määriteltäviä standardeissa ja infrarakentamisen yleisissä laatuvaatimuksissa, InfraRYL:ssä. Vanhojen, olemassa olevien ratojen materiaaliominaisuudet voivat kuitenkin poiketa näistä vaatimuksista, sillä alusrakenteiden materiaali vaatimuksia on esitetty vasta 1960-luvulta alkaen. Tätä ennen materiaalit on valittu silmämääräisesti. Silmämääräisesti valitut materiaalit ovat edelleen rakenteissa, ellei niitä ole perusparannuksen yhteydessä poistettu. Uusien vaatimusten mukaisia rakenteita on tyypillisesti rakennettu vanhojen rakenteiden päälle, joten vanhoja materiaaleja löytyy etenkin alusrakenteesta. (Saarinen 2008, s. 10)

Ratapenger rakennetaan routimattomista materiaaleista, joiden rakeisuus, raekokoja-kauma ja jotkin toimivuusominaisuudet on esitetty standardeissa ja InfraRYL 2010 -vaatimuksissa. Seuraavissa alaotsikoissa on käsitelty radan rakennekerroksia nykyisten vaatimusten pohjalta. Vanhojen ratojen osalta rakennetta ja materiaaliominaisuuksia voi tulkita vain tapauskohtaisesti, sillä käytetyt materiaalit voivat olla lähes mitä tahansa.



## Tukikerros

Tukikerros on karkeasta kiviainesmateriaalista rakennettu kerros, jonka päällä ratapölkyt lepäävät. Tukikerros rakennetaan välikerroksen päälle. Tukikerroksen tehtävä on muodostaa raiteelle tasainen ja kantava alusta, joka pitää raiteen geometrisesti oikeassa asemassa ja asennossa. Tukikerros ottaa vastaan ratapölkyiltä tulevat kuormat ja jakaa ne alusrakenteelle. (Ratahallintokeskus 2002, s. 6)

Tukikerroksen materiaali ja mitat riippuvat radalle asetetuista vaatimuksista, kuten sallitusta nopeudesta, ja muista käytettävistä rakenneosista kuten pölkytyypistä ja kiskonpiituksesta. Tyypillisesti tukikerroksen paksuus on 350–550 mm Kv-tasosta alaspäin. Betoniratapölkyillä tukikerroksen paksuus on 550 mm. (Ratahallintokeskus 2002, s. 15-17)

Tukikerros rakennetaan raidesepelistä tai raidesorasta. Raidesepelin materiaaliominaisuudet on esitelty standardissa *SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset* sekä sitä täydentävässä kansallisessa liitteessä *SFS 7007*. Standardin lisäksi noudatetaan Ratahallintokeskuksen hyväksymää kansallista soveltamisohjetta. Raidesepelin raekoko on tyypillisesti 31,5...63 mm tai 31,5...50 mm. (SFS-EN 13450 + AC 2002). Raidesoran materiaalivaatimukset on esitetty julkaisussa *Päälysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset (PYL)*. Raidesoraa ei käsitellä tässä tutkimuksessa tarkemmin, sillä raidesoraa käytetään Suomessa vain harvoilla rataosuuksilla.

Rakeisuuden lisäksi raidesepelistä tulee määrittää muiden muassa litteysluku, iskunkestävyys sekä kulutuskestävyys (SFS-EN 13450 + AC 2002). Raidesepelin tulee olla kestävä sekä iskevää että hiovaa kulutusta vastaan, jotta sepelin hienoneminen ratarakenteessa olisi mahdollisimman vähäistä. Sepelirakeiden muodolla on myös väliä, sillä litteät ja puikkoiset rakeet katkeavat ja hienonevat helpommin. (Nurmikolu 2004, s. 37-38)

Tukikerrosmateriaalien ominaisuudet muuttuvat radan elinkaaren aikana. Tukikerrosmateriaalit altistuvat toistuvasti suurille ulkoisille kuormille, joita aiheuttavat etenkin liikennekuorma ja ympäristöolosuhteet. Näitä kuormituksia on tarkasteltu myöhemmissä luvuissa. Tukikerroksen materiaalit muodostavat verkkomaisen rakenteen, jossa rataa kohdistuvat kuormitukset siirtyvät rakenteessa alaspäin raidesepelin pistemäisiä kontaktikohtia pitkin. Kuormien siirtyminen rakenteessa ei ole lainkaan tasaista. Näissä pistemäisissä kontaktikohdissa kuormat voivat olla niin suuria, että sepelirae tai sen särmä murtuu ja aiheuttaa sepelirakeiden uudelleenjärjestymisen, jossa hienontuneet partikkelit valuvat isompien partikkeleiden väliin jääviin tyhjätiloihin ja uudet kontaktipinnat muodostuvat. Tämä uudelleenjärjestyminen on havaittavissa tukikerroksen tiivistymisenä ja leviämisenä. Tukikerroksen tiivistyminen ja leviäminen heikentävät radan geometriaa. Radan geometriaa parannetaan tukemalla sekä seulomalla ja vaihtamalla raidesepeliä. Raiteen tukeminen tukemiskoneella hienontaa myös itsessään raidesepeliä. (Nurmikolu 2004)

Kuormituskestävyyden kannalta tukikerros on hyvin tärkeä osa ratarakenteessa. Tukikerroksen kuormituskestävyyttä on vaikea määrittää sen muuttuvien ominaisuuksien vuoksi. Ympäristöolosuhteiden muutokset vaikuttavat myös tukikerroksen kuormituskestävyyteen, sillä esimerkiksi hienontuneella sepelillä vesipitoisuuden nousu voi johtaa kuormituskestävyyden heikentymiseen. (Kalliainen et al. 2014)

## Välikerros

Välikerroksen tehtävä on muodostaa tasainen ja kantava alusta tukikerrokselle. Välikerros myös estää tukikerroksen raidesepeli tai -soran sekoittumisen alapuolisiin rakennekerroksiin. (Liikennevirasto 2014a, s. 8) Välikerroksen paksuus on tyypillisesti 300 mm ja se tulee rakentaa yhtenä kerroksena sulan maan aikana (InfraRYL 2010).

Välikerroksen materiaalivaatimukset on esitetty InfraRYL:ssä. InfraRYL:n (2010) mukaan välikerroksessa voidaan käyttää routimatonta hiekkaa, soraa tai kalliomursketta. Jos välikerroksen alla oleva eristyskerros rakennetaan kalliomurskeesta, tulee välikerros rakentaa samanaikaisesti ja samasta kalliomurskeesta kuin eristyskerroskin.

## Eristyskerros

Eristyskerros sijaitsee välikerroksen alapuolella. Kerroksen tehtävä on estää tai vähentää alapuolisten maakerrosten routimista ja toimia kapillaarikatkona. Eristyskerros muodostaa kantavan ja tasaisen alustan välikerrokselle sekä jakaa ratarakenteeseen kohdistuvia kuormia edelleen alapuolisille rakenteille. (InfraRYL 2010). Eristyskerroksen paksuus määritetään routamitoituksen perusteella (Liikennevirasto 2014a).

Eristyskerros voidaan rakentaa hiekasta, sorasta tai kalliomurskeesta. Materiaaleja ei saa kuitenkaan sekoittaa keskenään. (InfraRYL 2010)

## Suodatinkerros

Suodatinkerros rakennetaan tarvittaessa eristyskerroksen ja pohjamaan väliin. Sen tehtävä on eristyskerroksen ja pohjamaan sekoittumisen estäminen. Suodatinkerros rakennetaan hiekasta. (InfraRYL 2010)

Suodatinkerroksen tarve on määritelty InfraRYL:ssä kriteerillä  $D_{15} / d_{85} < 5$ , jossa  $D_{15}$  on eristyskerrosmateriaalin läpäisyprosenttia 15 vastaava raekoko ja  $d_{85}$  on pohjamaan läpäisyprosenttia 85 vastaava raekoko. Jos kyseinen ehto ei täyty, vaatii ratarakenne suodatinkerroksen estämään eristyskerroksen ja pohjamaan sekoittumista. Valmiin suodatinkerroksen paksuus on 300 mm  $\pm$  100 mm. (InfraRYL 2010)

## Pengertäyte

Pengertäytettä tarvitaan tasoittamaan maanpinnalla esiintyviä korkeusvaihteluja ja saatamaan rata haluttuun tasoon. Pengertäytteenä voidaan käyttää soveltuvien osien moreenia, karkearakeisia maalajeja, kuten hiekkaa ja soraa, tai kalliomursketta. Soveltuvien materiaalien rakeisuuskäyrät on esitetty InfraRYL:ssä. (InfraRYL 2010)

### 3.1.4 Pohjamaa

Pohjamaalla, eli perusmaalla, tarkoitetaan ratapenkereen alla olevaa maata (Liikennevirasto 2014a, s. 6). Pohjamaan tehtävä on tarjota vakaa alusta ratarakenteelle. Jotta pohjamaa täyttäisi sille annetun tehtävän, tulee sen vastustaa muodonmuutoksia. Näitä muodonmuutoksia ovat liiallinen plastinen muodonmuutos, konsolidaatio ja massiivinen leikkausmurtuma, etenevä leikkausmurtuma, liiallinen turpoaminen ja kutistuminen, routaus ja sulamispehmeneminen sekä kulumisen. (Selig & Waters 1994, s. 10.1)

Suuri osa etenkin vanhoista radoista on perustettu maanvaraisesti suoraan pohjamaan päälle. Osa radoista taas on rakennettu erilaisten pohjanvahvistusten, kuten stabilointien tai paalulaattojen, varaan. Tässä työssä käsitellään vain maanvaraisesti perustettuja ratoja, joten erilaisia pohjanvahvistustapoja ei tässä esitellä. Luvussa 6 esitellään kuitenkin joitakin pohjanvahvistustoimenpiteitä, jotka soveltuvat olemassa olevan, maanvaraisesti alun perin perustetun radan kuormituskestävyyden parantamiseen.

Radalla liikennöivän kaluston aiheuttamat kuormitukset siirtyvät ratarakenteen kautta lopulta pohjamaalle. Kuormat jakautuvat ratarakenteessa suuremmalle alalle, jolloin pohjamaalle kohdistuva kuormitus on enää vain pieni osa kiskoihin kohdistuvasta kuormasta. Kuormien jakautumisesta ratarakenteessa on kerrottu tarkemmin luvussa 3.1.2.

Pohjamaalla on merkitystä kuormituskestävyyden kannalta, sillä se vaikuttaa niin rakenteen kantavuuteen kuin routimiseenkin. Maakerrosten paksuus, maalaji, maamateriaalien ominaisuudet sekä pohjavesi vaikuttavat suuresti radan ominaisuuksiin ja radan jäykkyyteen (Selig & Waters 1994, s. 10.1).

Maalajit määritetään raekokojakautumien perusteella. Suomalaisen geoteknisen maalajiluokituksen (GEO-luokitus) mukaan maalajit voidaan jakaa karkeasti moreeniin, eloperäisiin maalajeihin sekä hieno- ja karkearakeisiin maalajeihin (Jääskeläinen 2011, s. 28-29). Hienorakeisia maalajeja ovat siltti ja savi. Karkearakeisia maalajeja ovat hiekka ja sora. Moreenit sisältävät kaikkia raekokoja. Eloperäiset maalajit ovat turve ja lieju. Maalajit saattavat sisältää useampaa kuin yhtä raekokoa, jolloin niille annetaan lisänimi kuvaamaan materiaalin raekokojakaumaa. (Jääskeläinen 2011)

Jääkaudet ovat vaikuttaneet merkittävästi Suomen maaperän syntymiseen ja kehittymiseen. Maaperämme muodostuu tyypillisesti useista päällekkäisistä kerroksista ja kerrostumista, joista alimmaisena on useimmiten pohjamoreeni. Suomen maaperästä moreenia onkin noin puolet pinta-alasta. Yli metrin paksuisia turvekerrostumia maaperästämme on noin 15 % ja avokalliota tai ohuita maapeitteitä noin 13 %. Savimuodostumia on noin 8 % ja sora- ja hiekkamuodostumia noin 5 %. (Taipale & Saarnisto 1991, s. 372). Maakerroksen paksuus on Suomessa tyypillisesti 3–4 m (Jääskeläinen 2011, s. 318) ja maakerroksen alla on peruskallio.

Suomen ratoja on vuosien saatossa rakennettu monenlaiselle pohjamaalle vaihtelevien pohjaolosuhteiden johdosta. Maaperän lisäksi rata on voitu perustaa myös esimerkiksi kallioleikkaukseen. Pohjamaan ominaisuudet vaikuttavat radan rakenneratkaisuihin, kuten perustamistapaan, pengerleveyteen ja alusrakenteen paksuuteen. Vanhojen ratojen geotekniset rakenneratkaisut eivät välttämättä vastaa nykypäivän vaatimuksia.

Pohjamaan ominaisuuksista kuormituskestävyyden kannalta tärkeitä ovat routivuus ja kantavuus. Taulukossa 3.1 on esitetty pohjamaan luokittelua maalajin perusteella InfraRYL 2010 mukaisesti katurakenteille. Maalajit voidaan jakaa seitsemään kantavuusluokkaan A–G niiden ominaisuuksien perusteella. Taulukossa on esitetty myös luokkien mukaiset kantavuusarvot. Taulukon arvoista voidaan havaita, että maalajien kantavuusarvojen vaihteluväli voi olla suurikin.

**Taulukko 3.1** Pohjamaan luokittelu routivuuden ja kantavuuden mukaan katurakenteilla. (Peltokangas et al. 2013, s. 36 (muokattu lähteestä InfraRYL 2010))

Maalaji	Tarkennus	Luokka	Kantavuus [MPa]
Kallio	kallio louhe murske	A	300
Kivet		A	300
Sora		B	150...280
Soramoreeni	routimaton routiva	C E	70...150 15...35
Hiekka	routimaton karkea routimaton keskik. routimaton hieno routiva keskik. routiva hieno	C D D E E	70...150 35...70 35...70 15...35 15...35
Hiekkamoreeni	routimaton routiva	D E	35...70 15...35
Siltti Silttimoreeni		F	5...15
Savi	kuivakuori ( $h \geq 1$ m) sitkeä ( $S_u \geq 25$ kN/m <sup>2</sup> ) pehmeä ( $S_u < 25$ kN/m <sup>2</sup> )	E F G	15...35 5...15 5
Lieju Turve		G	5

Kantavuus kuvaa jäykkyyttä, jolloin suuren kantavuuden omaava pohjamaa on jäykempi kuin alhaisen kantavuuden omaava pohjamaa. Kantavuutta voidaan mitata levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella. (Kalliainen et al. 2011, s. 26). Väylärakenteen kantavuus mitataan väylärakenteen päältä, jolloin saadaan selville rakenteen kokonaisjäykkyys. Kokonaisjäykkyyteen vaikuttavat pohjamaan kantavuuden lisäksi rakennekerrosten kantavuus.

Maalajit voidaan jakaa routiviin ja routimattomiin maalajeihin. Routivia maalajeja ovat hienorakeiset maalajit savi ja siltti sekä hieno hiekka. Myös moreenit ovat usein routivia riippuen esimerkiksi niiden hienoainespitoisuudesta. (Jääskeläinen 2011, s. 93). Maalajien routivuuksia on esitetty taulukossa 3.1 InfraRYL 2010 mukaisesti. Vaikka ratarakenteissa käytetään routimattomia materiaaleja, pohjamaa voi siltti olla routiva. Routimattomilla rakennekerrosmateriaaleilla ja rakennekerrosten paksuudella pyritään estämään roudan tunkeutuminen routivaan pohjamaahan asti ja estää näin routimisen haittoja rata-rakenteelle.

Pohjamaan hydrauliset ominaisuudet vaikuttavat routimiseen ja leikkauslujuuteen. Hydraulisiin ominaisuuksiin kuuluvat kapillaarisuus, vedenläpäisevyys sekä huokosveden paine. Kapillaarisuus kertoo, kuinka suuren kapillaarisen nousun maamateriaali mahdollistaa vedelle. Kapillaarisuus on kääntäen verrannollinen raekokoon, eli mitä pienirakeisempaa materiaali on, sitä suurempi on sen kapillaarisuus. Savella ja siltillä kapillaarinen nousukorkeus voi olla jopa useita metrejä. Suuri kapillaarisuus mahdollistaa esimerkiksi pohjaveden virtaamisen jäätymisvyöhykkeisiin routaantumisen yhteydessä. (Jääskeläinen 2011, s. 38-39)

Vedenläpäisevyys kuvaa maamateriaalin kykyä läpäistä vettä veden virtausnopeuden avulla. Karkeasti voidaan todeta, että mitä pienempää raekokoa materiaali sisältää, sitä huonommin se läpäisee vettä. Esimerkiksi sora ja hiekka läpäisevät vettä hyvin, mutta savi on lähes vettäläpäisemätöntä. (Rantamäki et al. 2009, s. 100-101; Jääskeläinen 2011, s. 68-69) Vedenläpäisevyydellä on merkitystä esimerkiksi kuivatusjärjestelmiin ja pohjamaan vesipitoisuuteen. Pohjamaan vesipitoisuus taas vaikuttaa esimerkiksi ratarakenteen routimiseen ja leikkauslujuusominaisuuksiin.

Huokosvedenpaineella taas on vaikutusta pohjamaan painumiseen ja kokoonpuristuvuuteen. Huokosvesipaine on oleellinen suure etenkin savikoilla. Ajan kuluessa lujittunut savikko kestää oman painonsa, mutta kun savikolle rakennetaan esimerkiksi ratapenger, saven kiviainesrakenne pyrkii puristumaan kokoon. Kokoonpuristuminen aiheuttaa huokosvedenpaineen kasvua ja vesi pyrkii poistumaan savesta. Koska saven vedenläpäisevyys on hyvin heikko, vesi ei pääse poistumaan rakenteesta. Tällöin lisääntynyt kuorma ei siirry kiviainespartikkelien muodostamalle raerungolle, vaan partikkelien välisen huokostilan täyttävä huokosvedenpaine kasvaa. Ajan myötä vesi poistuu rakenteesta, raerunko pääsee tiivistymään ja huokosvedenpaine laskee. Tämä aiheuttaa savikon painumista eli konsolidaatiota. (Jääskeläinen 2011, s. 80)

Leikkauslujuus kuvaa maalajin kykyä vastustaa maan murtumista. Maan leikkauslujuus koostuu kahdesta komponentista: koheesiosta ja kitkasta. Saven leikkauslujuus muodostuu täysin koheesiosta ja karkearakeisilla maalajeilla, kuten soralla ja hiekalla, se koostuu täysin materiaalin sisäisestä kitkasta. Siltillä leikkauslujuus koostuu tyypillisesti osittain sekä koheesiosta että kitkasta. Moreenit ajatellaan kitkamaalajeiksi, sillä koheesion määrä suhteessa sisäiseen kitkaan on yleensä pieni. Koheesio on maahiukkasten välisiä kiinnevoimia ja sähköstaattisia voimia mineraalihiukkasten tai niitä ympäröivien vesivaippojen välillä. (Jääskeläinen 2011, s. 100; Rantamäki et al. 2009, s. 122-123). Pohjamaan leikkauslujuuden ylittyminen voi johtaa pysyviin muodonmuutoksiin esimerkiksi pengertöiden sortuessa.

Kuormituskestävyyteen vaikuttavat myös maan kokoonpuristuvuusominaisuudet. Pohjamaan kokoonpuristuminen koostuu kolmesta pääajasta: kimmoisesta ja plastisesta kokoonpuristumisesta sekä konsolidaatiosta, jota jo aiemmin käsiteltiin. Kimmoinen kokoonpuristuvuus syntyy rakennetta kuormitettaessa, jolloin maamassa painuu sekä pullistuu sivuille ja ylös, mutta maarakeet eivät liu'u toistensa suhteen. Kuormituksen poistuksessa muodonmuutokset palautuvat alkuperäiseen asemaansa. Plastisessa kokoonpuristuvuudessa maamassa painuu ja pullistuu kuten kimmoisessa painumassa. Plastisessa kokoonpuristuvuudessa rakeet liukuvat toistensa suhteen, eivätkä muodonmuutokset palaudu, vaikka kuormitus poistettaisiin. Konsolidaatio on pohjamaan puhdasta tiivistymistä, eli maamassa ei pullistu sivuille eikä ylöspäin. Konsolidaation yhteydessä maamassan huokostila pienenee, eli rakenteesta poistuu ilmaa tai vettä. Kimmoisen painuman määrä on tyypillisesti hyvin pieni. Plastisessa painumassa syntyy pysyviä muodonmuutoksia, joten plastista kokoonpuristuvuutta pyritään välttämään käyttämällä riittävää varmuutta murtoa vastaan. Suurin osa painumista on konsolidaatiopainumaa. (Jääskeläinen 2011, s. 120-122; Rantamäki et al. 2009, s. 145-146). Ratarakenteessa pohjamaalle aiheuttaa kuormia sekä ratapenger että junaliikenne. Kokoonpuristuvuus voi aiheuttaa pohjamaan ja ratarakenteen epätasaista painumista, joka havaitaan radan heikentyneenä geometriana.

Yksittäinen liikennekuormitus aiheuttaa pääosin palautuvan muodonmuutoksen, mutta pienen osan myös palautumatonta muodonmuutosta. Kuormituskertojen toistuessa alkavat nämä palautumattomat muodonmuutokset kumuloitua. (Ehrola 1996, s. 171)

### 3.2 Ympäristöolosuhteet

Radan rakenneosien ja pohjamaan lisäksi ympäristöolosuhteilla on tärkeä osa radan kuormituskestävyydessä. Ympäristöolosuhteet luovat radalle vaihtelevat olosuhteet, jotka vaikuttavat ratarakenteeseen kohdistuviin kuormituksiin. Merkittävimmät ympäristötekijät ratarakenteen kuormituksiin liittyen ovat vesi ja lämpötila.

Vesi vaikuttaa merkittävästi ratarakenteessa käytettävien materiaalien ominaisuuksiin sekä yhdessä lämpötilan kanssa rakenteen routimiseen. Sadannan määrällä ja laadulla on

vaikutusta sekä ratarakenteen kuivatusolosuhteisiin että routaan ja routimiseen. Runsaat vesisateet vaativat toimivia kuivatusjärjestelmiä ja nostavat pohjaveden pintaa, mikä voi lisätä rakenteen routimista. Lumisateet suojaavat rakennetta roudalta, mikäli rakenteen päälle pääsee muodostumaan lumipeite. Sulava lumi taas aiheuttaa keväällä haasteita radan kuivattamiselle.

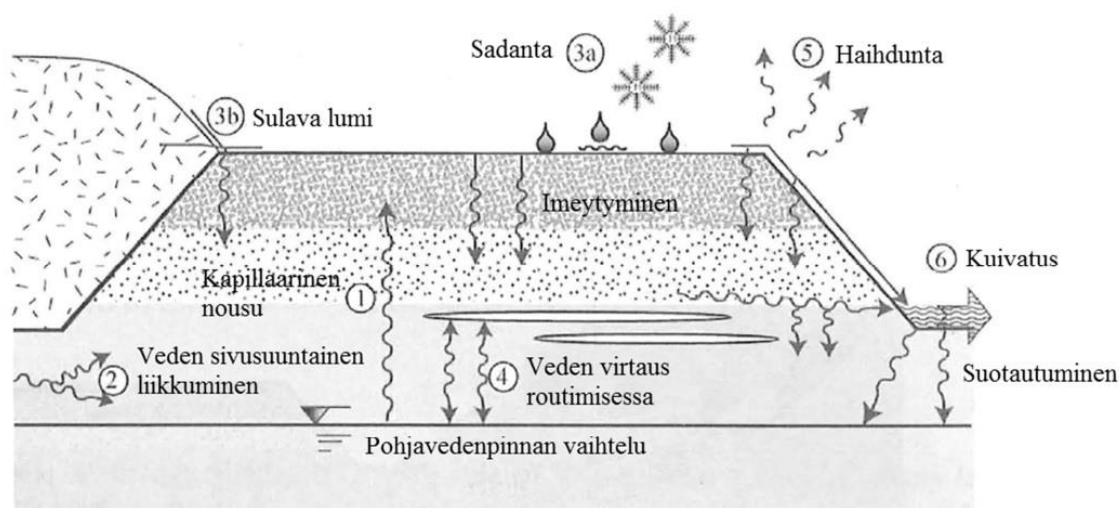
Lämpötila ja sen vaihtelu vaikuttavat ratarakenteeseen monin tavoin. Lämmin ilma lisää veden haihtumista rakenteesta ja lämpötila ja sen vaihtelut aiheuttavat muutoksia rataan kohdistuvissa kuormituksissa. Näitä raiteeseen vaikutuksia kuormitusvaikutuksia on tarkasteltu kappaleessa 3.3.4. Lämpötilan mennessä pakkaselle alkaa ratarakenteen routautuminen, jota käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.2.2. Maarakenteissa oleva huokosvesi jäätyy ja jäätyminen seurauksena veden tilavuus kasvaa, mikä voi aiheuttaa kiviaineksen rapautumista ja hienonemista. Rakennekerrosten hienontumisella voi olla vaikutusta rakenteiden kuivatukseen, routivuuteen ja näin myös kuormituskestävyyteen.

Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tarkemmin radalla vallitsevien kuivatusolosuhteiden ja roudan vaikutuksia kuormituskestävyyteen.

### **3.2.1 Kuivatusolosuhteet**

Kuivatusolosuhteet vaikuttavat merkittävästi ratarakenteen toimintaan. Puutteellinen kuivatus voi johtaa radalla huokospaineen kasvuun ja siten jäykkyyden ja lujuuden pienene-miseen, hydrauliseen pumppautumiseen, rakenteen tilavuuden muutoksiin, routimiseen, sulamispehmenemiseen, tukikerroksen rapautumiseen ja pölkkyjen kulumiseen. (Selig & Waters 1994, s. 13.1-13.2)

Kuvassa 3.10 on esitetty veden kulkeutumista väylärakenteessa. Numerolla yksi on kuvattu veden kapillaarista nousua pohjavedestä ratarakenteeseen. Vesi voi liikkua maarakenteissa myös sivuttaissuunnassa (2). Tällaista sivuttaista liikkumista on esimerkiksi suotautuminen. Keväällä sulava lumi vapauttaa merkittävän määrän vettä ratarakenteeseen (3a). Sadanta sekä vetenä että lumena kasvattavat ratarakenteen kosteustilaa (3b). Rakenteen routiessa vettä virtaa routimisvyöhykkeeseen muualta rakenteesta sekä pohjavedestä (4). Osa sadannasta haihtuu rakenteen pinnalta takaisin ilmakehään (5). Haihdunnan suuruuteen vaikuttavat esimerkiksi lämpötila, ilman kosteusprosentti ja tuuli. Kuivatusjärjestelmät johtavat vettä pois rakenteista (6).



**Kuva 3.10** Veden kulkeutuminen väylärakenteessa. (Isohaka 2014; muokattu lähteestä Doré & Zubeck 2009)

Ratarakenteen kuivatus on tärkeää routimisen vähentämiseksi sekä kantavuuden ja kuormituskestävyyden säilyttämiseksi. Kuivatuksen toimivuuden kannalta on tärkeää pitää tukikerros mahdollisimman puhtaana, jotta sadevesi pääsee imeytymään tukikerroksen läpi. Väli- ja eristyskerrosten sekä pohjamaan tulisi viettää kohti ratarakenteen reunoja, jotta voidaan välttää veden kerääntyminen ja valuminen ratarakenteen alle. Kuivatusjärjestelmän tulee johtaa pois ratarakenteesta suotautuva vesi. (Selig & Waters 1994, s. 3.13-3.14; InfraRYL 2010)

Kuivatusjärjestelmät voidaan InfraRYL:n mukaisesti jakaa rata-alueen pintakuivatukseen ja ratarakenteen kuivatukseen. Rata-alueen pintakuivatusrakenteita ovat esimerkiksi sivu-, leikkaus- ja niskaojat. Ojien tehtävänä on koota rata-alueelta ja sen ulkopuolelta tulevat pintavedet. Ojat johtavat vedet maastonkohtiin, joista vedet voidaan laskuojien kautta purkaa vesistöön tai muuhun sopivaan paikkaan. Ratarakenteen kuivatus kattaa rakennekerrosten kuivatuksen niiden alapintaan saakka. Kuivatusrakenteita ovat esimerkiksi avo-, sala- ja suoto-ojat, salaojakaivot, hulevesiviemärit sekä rata- ja sivuojarummut. (InfraRYL 2010)

Tukikerroksessa käytettävä kiviaines hienonee ajan mittaan toistuvien kuormitusten alla. Tukikerroksessa lisääntyvä hienoaines hidastaa veden kulkeutumista sepelin läpi, mikä nostaa tukikerroksen vesipitoisuutta. Samoin myös alusrakenteen hienoneminen hidastaa veden kulkeutumista ja nostaa vesipitoisuutta rakenteessa.

Kuivatusjärjestelmän toimivuudesta tulee huolehtia rakentamisen jälkeenkin. Ojiin ja ratarumpuihin kertyy tyypillisesti maamateriaaleja ja kasvillisuutta, jotka hidastavat ja pahimmillaan estävät kokonaan veden virtaamista ojassa (Liikennevirasto 2013c). Ojat ja rummut tulisi perata ja puhdistaa säännöllisesti, jotta kuivatusjärjestelmä toimisi optimaalisesti. Tukkeutuneet ojat ja ratarummut voivat aiheuttaa veden patoutumista ja aikaansaada vedellä kyllästyneen tilanteen radan rakennekerrokseen.



Vesipitoisuuden nousu heikentää rakennekerrosten kantavuutta ja kuormituskestävyyttä. Erityisen tärkeäksi kuivatusjärjestelmät nousevat keväällä roudan ja lumien sulamisen aikaan sekä syksyllä runsaiden sateiden myötä. Radan kuivatuksen toimivuuden ja ympäristöolosuhteiden vaikutuksen vuoksi radan kuormituskestävyys ei ole vakio. Kuivatusjärjestelmän toimivuudella voidaan ehkäistä routimista sekä sulamispehmenemistä, joita on käsitelty tarkemmin seuraavassa kappaleessa 3.2.2.

### 3.2.2 Routa

Maa-ainekset sitovat vettä, joka jäätyy lämpötilan laskettua pakkaselle maakerroksessa. Tätä huokosveden jäätymistä kutsutaan routaantumiseksi, joka tapahtuu materiaalin ominaisuuksista riippumatta. Routimiseksi kutsutaan haitallisia ilmiöitä maakerroksen routaantuessa tai sulaessa. Näitä haitallisia ilmiöitä ovat routanousu ja sulamispehmeneminen, jotka taas ovat ulkoisten tekijöiden lisäksi riippuvaisia materiaalin ominaisuuksista. (Nurmikolu 2004, s. 78)

Routimista tapahtuu, mikäli seuraavat routimisen perusedellytykset täyttyvät (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 65):

1. Tarkasteltavan maamateriaalin on oltava routivaa
2. Lämpötilan tulee olla alle 0°C, jotta routiva maakerros voi jäätyä
3. Jäälinsin muodostumispaikalle tulee olla saatavilla vettä
4. Routimispaineen pitää ylittää yläpuolisten maakerrosten ja rakenteiden aiheuttama kuormitus.

Jos yksikin näistä perusedellytyksistä ei täyty, routimista ei tapahdu tai se tapahtuu rajoitetusti. (Ehrola 1996, s. 98)

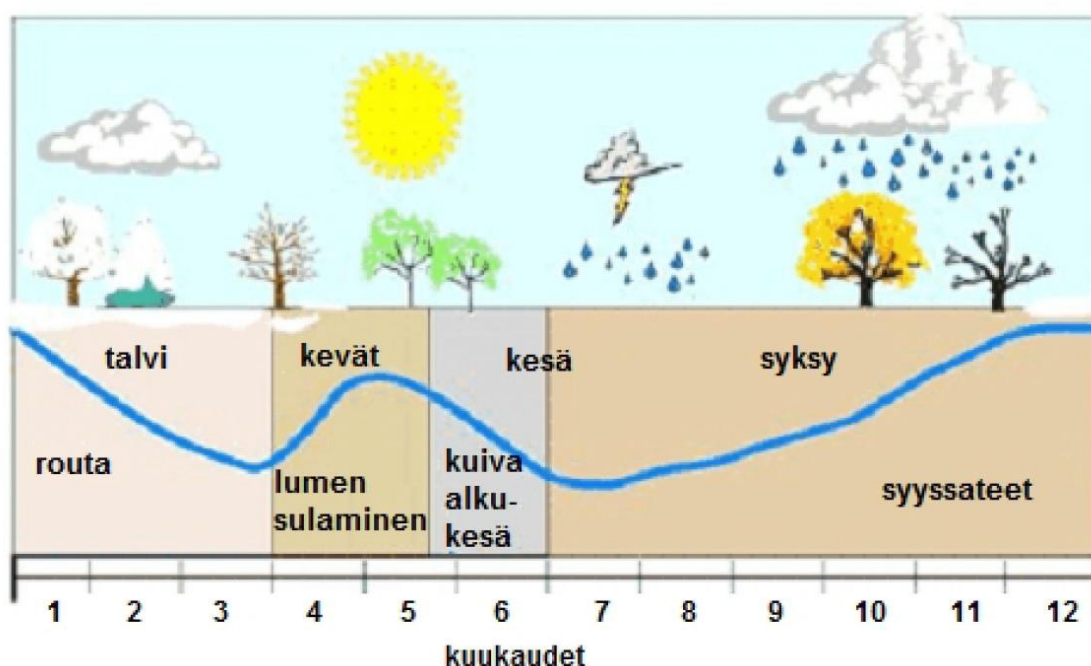
Routanousun syntyminen johtuu pääasiassa jäälinsien muodostumisesta. Jäälinsit muodostuvat, kun jäälinsien muodostumispaikalle virtaa vettä sulasta maasta. Jäälinsien muodostuminen kasvattaa maan tilavuutta, mikä näkyy maan pinnalla routanousuna. Routivaksi materiaaliksi kutsutaan maamateriaalia, joka pystyy muodostamaan jäälinssejä, kun gravitaatio- tai kapillaarivettä on saatavilla maakerroksessa. Kaikki materiaalit eivät siis ole routivia. Routimaton materiaali voi kuitenkin routia vedellä kyllästetyssä tai lähes kyllästetyssä tilanteessa, sillä jäätyessä veden tilavuus kasvaa 9 %. Tämä in-situ-routanousuksi kutsuttu tapahtuma vaatii kuitenkin suljetun tilanteen, eli tilanteen, jossa vesi ei pääse poistumaan rakenteesta. (Nurmikolu 2004, s. 78-79)

Roudan syvyyteen ja routanousun suuruuteen vaikuttavat esimerkiksi maalajiominaisuudet, kuten vesipitoisuus ja raekokojakauma, yläpuolisen rakenteen paino, pohjaveden pinnan korkeus, pakkaskauden kesto ja pakkasmäärä, sateen määrä, olomuoto ja kertymisajankohta sekä tuulten voimakkuus ja jakauma ilmansuunnittain. (Ehrola 1996, s. 98-107; Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 44-45). Karkearakeisissa maalajeissa routaantumista

tapahtuu tyypillisesti syvemmälle, mutta routimista ja routanousuja tapahtuu materiaaleilla, joiden hienoainespitoisuus on riittävä (Soveri & Varjo 1977, s. 27-28). Ratapenkereen paino taas vastustaa routanousun syntymistä.

Lumipeite toimii eristeenä. Lumipeitteen paksuus ja lumen tiheys vaikuttavat syntyvän routakerroksen paksuuteen. Mitä paksumpi lumipeite ja mitä kevyempää lumi on ennen routaantumista, sitä parempi eristysvaikutus ja ohuempi routakerros syntyy. (Soveri & Varjo 1977, s. 20-21). Tuulet vaikuttavat esimerkiksi lumen kinostumiseen, jolloin lumipeitteen paksuus voi vaihdella suuresti ratapenkereen eri puolilla.

Pohjaveden pinnan korkeus vaihtelee vuodenajoittain ja on riippuvainen sääolosuhteista ja etenkin sateista (kuva 3.11). Talvella maan routaantuessa pohjaveden pinta laskee, sillä uutta pohjavettä ei pääse muodostumaan jäätyneen maan läpi. Keväällä lumien ja roudan sulaessa pohjaveden pinta nousee. Kesällä sateiden vähetessä pohjaveden pinta laskee, kunnes syyssateiden vaikutuksesta pohjaveden pinta nousee jälleen. Mitä korkeammalla pohjaveden pinta on routaantumisen alkaessa, sitä helpommin vettä virtaa jäätymissyöhykkeisiin. (Ehrola 1996, s. 119-121) Pohjaveden pinta on Suomessa tyypillisesti 2–4 m syvyydellä maanpinnasta (Rantamäki et al. 2009, s. 53).



**Kuva 3.11** Pohjaveden pinnan korkeuden vaihtelu vuodenajoittain. (Lounais-Suomen ympäristökeskus 2008, viitattu lähteestä Isohaka 2014)

Pakkaskauden kestolla ja pakkasmäärällä on vaikutusta routimisen suuruuteen. Pakkaskausi alkaa, kun vuorokauden keskilämpötila syksyllä laskee ensimmäistä kertaa alle  $0^{\circ}\text{C}$ . Pakkaskausi päättyy, kun vuorokauden keskilämpötila keväällä nousee pysyvästi yli  $0^{\circ}\text{C}$ . Pakkasmäärä taas ilmoitetaan summana pakkaskauden vuorokausien keskilämpötiloista. (Ehrola 1996, s. 83). Pakkaskauden pituuden ja pakkasmäärän avulla kuvaillaan talven

ankaruutta. Mitä pidempi pakkaskausi on ja mitä ankarampi talvi on pakkasmäärältään, sitä syvemmälle maakerrokset periaatteessa routaantuvat ja mahdollistavat suuremmat routanousut.

Maan routaantuessa sen kantavuus paranee hetkellisesti, sillä jäätynyt maarakenne on jäykempi kuin sula. Jäätynyt rakenne pystyy vastustamaan paremmin ulkoisten kuormien aiheuttamia pysyviä muodonmuutoksia. Toisaalta hyvin jäykkä, routaantunut rakenne aiheuttaa suhteessa suurempia jännityksiä päällysrakenteelle talvella kuin kesällä (Kalliainen et al. 2014, s. 21).

Sulamispehmenemistä esiintyy tyypillisesti keväällä roudan sulaessa. Roudan sulaminen alkaa tyypillisesti rakenteen päältä ilman lämpötilan kohotessa nollan yläpuolelle. Routa sulaa osittain myös alhaaltapäin maalämmön vaikutuksesta. Alapuoliset rakenteet ovat yleensä sulamisen alkaessa vielä jäässä, jolloin sulanut vesi ei pääse poistumaan ratarakenteesta alapuolisten kerrosten läpi. Toisaalta, maan huokostila on voinut jo syksyn sateiden jäljiltä kyllästyä vedellä ja sulamisvesi vain pahentaa tilannetta edelleen. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 97; Ehrola 1996, s. 82-84)

Routimisen seurauksena maan tilavuus on kasvanut ja maakerros on löyhemmässä tilassa kuin ennen routimista. Vedellä kyllästetty, löyhtynyt rakenne pyrkii palaamaan alkupeiräiseen tiiveyteensä maakerrosta kuormitettaessa, mikä vaatii veden poistumista rakenteesta. Kuormitus kasvattaa huokosvedenpainetta, joka puolestaan pienentää tehokasta jännitystä maassa. Tämä johtaa maan leikkauslujuuden pienenemiseen, kimmoisen jäykkyyden laskemiseen ja muodonmuutoksen vastustuskyvyn huonontumiseen. (Ehrola 1996, s. 126-128) Sulamispehmeneminen alentaa näin rakenteen kantavuutta ja kuormituskestävyyttä hetkellisesti. Ratarakenteessa sulamispehmeneminen vaikuttaa pohjamaahan, mikäli routaantuminen yltää pohjamaahan asti. Vanhoilla radoilla sulamispehmenemistä voi tapahtua myös rakennekerroksissa, joissa maamateriaalien ominaisuudet ovat puutteelliset.

Sulamispehmenemisen kaltaista rakenteen kantavuuden alentumista voi tapahtua myös syksyisin runsaiden sateiden jälkeen. Runsas sade voi aiheuttaa maakerroksen vesipitoisuuden kasvun, joka alentaa kantavuutta ja kuormituskestävyyttä kuten sulamispehmeneminen. Syyssateiden vaikutus ei ole kuitenkaan yhtä suuri kuin sulamispehmenemisen vaikutukset. (Ehrola 1996, s. 126)

Routimisesta ja sulamispehmenemisestä johtuen voidaan todeta, että radan kuormituskestävyys ei ole vakio. Vuodenajat ja sääolosuhteet muuttavat radan kantavuuteen ja kuormituskestävyyteen vuoden aikana. Kuormituskestävyys on suurin talvella rakenteen ollessa jäässä. Kesällä kuormituskestävyyden voidaan ajatella olevan normaali. Syksyllä ja keväällä kuormituskestävyys voi alentua huomattavastikin.

### 3.3 Junakuormat

#### 3.3.1 Junakuormien ominaispiirteet

Luonnonolosuhteiden lisäksi rataan kohdistuu liikennekuormia radalla liikkuvasta juna-kalustosta. Nämä liikennekuormat ovat pysty-, poikittais- ja pitkittäiskuormia, jotka vaikuttavat suuresti radan kuormituskestävyyteen ja siten myös käyttöikänsä. Kuormat voidaan jakaa edelleen dynaamisiin ja kvasistaattisiin kuormiin. (Esvelde 2001; Selig & Waters 1994)

Kvasistaattiset kuormat syntyvät junakaluston painosta, keskipakovoimasta kaarteissa ja vaihteissa sekä sivutuulesta. Dynaamisia kuormia aiheuttaa radan epäsäännöllisyyksistä ja jäykkyyden vaihteluista ratarakenteesta, epäjatkuvuuskohdista, kuten vaihteista ja hitsaustista, kiskon kulkupinnan epätasaisuuksista sekä kalustovioista, kuten lovipyyristä. (Esvelde 2001, s. 57). Dynaamisten kuormien suuruuteen vaikuttavat puolestaan junan nopeus, staattinen akselipaino ja pyörän halkaisija, kaluston jousittamaton massa ja kaluston kunto, radan kunto sekä rataluokka ja radan rakennekerrosten kunto (Kalliainen et al. 2014, s. 24; Indraratna et al. 2011, s. 26-27).

Suomessa käytössä on lähinnä sekaliikenne ratoja, joilla liikkuu sekä kevyttä henkilöliikennettä että raskasta tavaraliikennettä. Suurimmat sallitut nopeudet ovat rataosakohtaisia. Suurin henkilöliikenteessä sallittu nopeus on 220 km/h ja tavaraliikenteessä 120 km/h (Liikennevirasto 2014b, s. 30). Rataverkolla sallitaan tyypillisesti 225 kN akselipaino, mutta sallittu akselipaino vaihtelee rataosittain. Tietyillä rataosilla sallitaan jopa 250 kN akselipaino. (Liikennevirasto 2014b). Tulevaisuudessa yhä useammilla rataosilla tavoitellaan 250 kN akselipainon saavuttamista kuljetuskapasiteetin lisäämiseksi (Kiuru et al. 2015). Henkilöliikenteessä akselipainot ovat pienempiä, noin 120–190 kN (Korkeamäki 2011, s. 22).

Kaluston ominaisuuksista akseli- ja telivälit, telirakenteet ja pyöräviat ovat merkittäviä kuormituksen suuruuden kannalta. Lyhyet akseli- ja telivälit kasvattavat todellista kuormitusta, sillä lyhyillä väleillä akseleiden ja telien yhteisvaikutus kasvaa, kun radan palautumisaika lyhenee. Lyhyet akselivälit telissä toisaalta parantavat telin kaarreominaisuuksia ja mahdollistavat telin kulkemisen kaarteesta ilman laippakosketusta. Laippakosketus aiheuttaa sivusuuntaisen voiman kiskoon. Myös telin jousitus vaikuttaa kiskoihin kohdistuvan kuormituksen suuruuteen. (Korkeamäki 2011). Pyöräviat voivat olla hyvin merkittäviä kiskoon kohdistuvien dynaamisten kuormien kannalta. Yleisimpiä vikoja ovat pyörien lovet, monikulmaisuus ja kulutuspinnan lohkeilu (Lahti 2008, s. 19). Hetkellinen pyöräkuorma saattaa jopa kolminkertaistua liikkuvalla junalla verrattuna staattiseen pyöräkuormaan (Nielsen & Igeland 1995, s. 833).

Ratarakenteen kunto ja radalla esiintyvät epäjatkuvuuskohdat voivat aiheuttaa dynaamisia kuormituslisäitä. Radan epätasainen painuminen ja kiskojen jatkos- ja hitsikohdat voivat

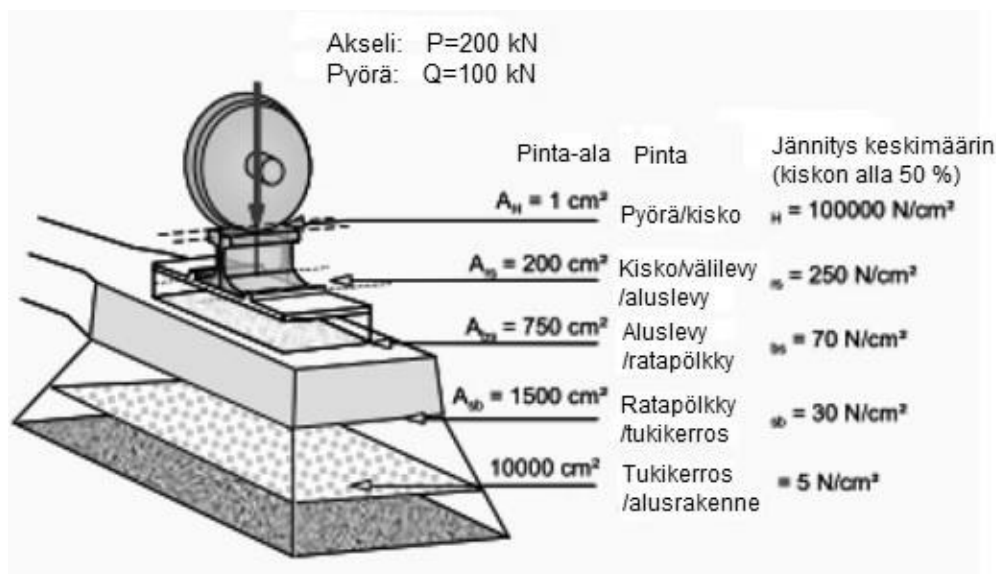
aiheuttaa dynaamisia kuormituksia. Radan jäykkyys vaihtelee esimerkiksi pohjamaalta sillalle siirryttäessä. Nämä jäykkyyserot voidaan myös havaita dynaamisina kuormituslisiinä. (Luomala et al. 2015)

Junakuormat ovat oleellinen tekijä radan kuormituskestävyydessä. Junaliikenne aiheuttaa voimia, jotka aiheuttavat kulumista ja vaurioita ratarakenteelle ja heikentävät näin radan kuormituskestävyyttä. Oleellista kuormituksella on sen toistuvuus ja suuruus, joiden perusteella voidaan määrittää rakenteen käyttöikä.

### 3.3.2 Pystykuormat

Pystykuormat ovat kohtisuoria kuormia kiskojen ja pölkkyjen muodostamaan tasoon nähden. Pystysuuntaiset pyöräkuormat koostuvat staattisesta pyöräkuormasta, sivutuulesta, ulkokiskon pyöräkuorman kasvusta kaarteessa sekä dynaamisista pyöräkuormista. Staattiseksi pyöräkuormaksi voidaan olettaa puolet akselipainosta, kun tilannetta tarkastellaan suoralla rataosalla. (Esveld 2001, s. 57). Pyöräkuormaa määritettäessä tulee kuitenkin huomioida, että todellisuudessa pyöräkuorma ei välttämättä ole puolta akselipainosta. Junan vaunun tasaisella tai epätasaisella lastaamisella on vaikutusta pyöräkuormiin. (Korkeamäki 2011, s. 14). Liikennekuormien lisäksi staattista kuormaa aiheuttavat radan rakenteet, jotka kuormittavat alempia kerroksia omalla massallaan (Kalliainen et al. 2014, s. 22)

Pystykuorman jakautumista ratarakenteessa on havainnollistettu kuvassa 3.12. Kuten aiemmin esitettyssä kuvassa 3.6 käy ilmi, kiskoon kohdistuvasta pyöräkuormasta pyörän alla olevaan pölkkyyn oletetaan kohdistuvan 50 %. Pyörän ja kiskon kontaktipinta on hyvin pieni ja moninkertaistuu pohjamaata kohden. Kontaktipintojen kasvaessa kuormitus jakautuu suuremmalle pinta-alalle ja lopulta pohjamaalle kohdistuva pystyjännitys on vain murto-osa kiskoon kohdistuneesta kosketuspaineesta.



**Kuva 3.12** Pyöräkuorman jakautuminen ratarakenteessa. (muokattu lähteestä Esveld 2001, s. 14)

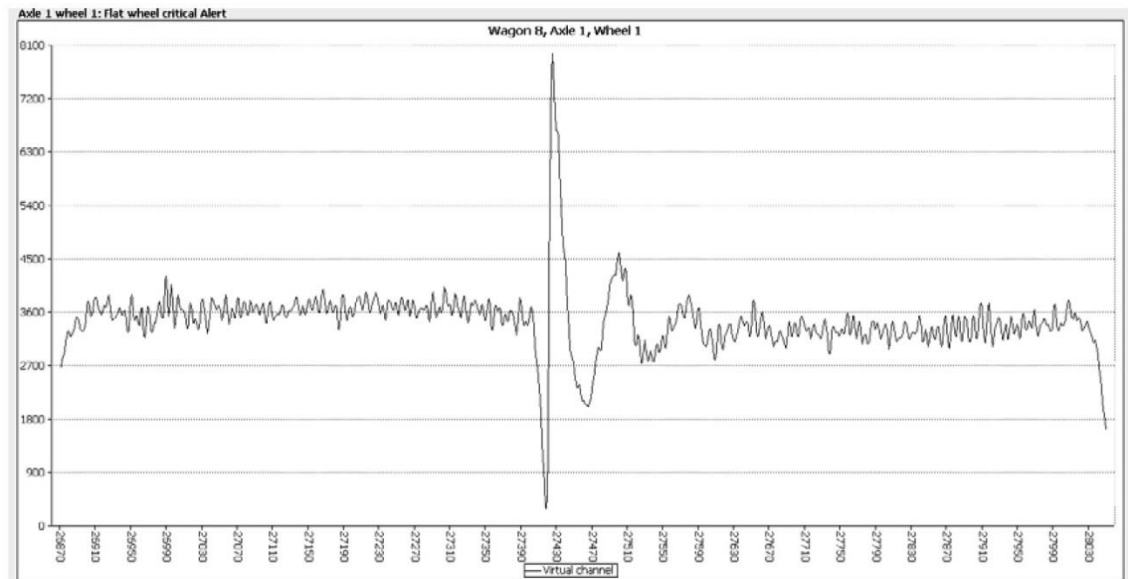
Selig & Waters (1994, s. 2.10) jakavat pystysuuntaiset voimat pystysuuntaiseen pyörävoimaan ja nostovoimaan. Pyörän alla vaikuttava, kiskoa alaspäin painava pyörävoima saa aikaan kiskon pyrkimyksen nousta ylöspäin pyörän edessä ja takana. Kiskon ja pölkyn paino sekä tukikerroksesta aiheutuva kitka pyrkivät vastustamaan näitä nostavia voimia. Jos nostava voima on suurempi, kisko ja pölkky nousevat ylös, mikä aiheuttaa pumppaavaa liikettä tukikerrokseen. Pumppauksen seurauksena ratarakenne voi heiketä.

Dynaamisten kuormituslisäysten määrittäminen on huomattavasti haastavampaa kuin staattisten kuormien määrittäminen. Dynaamisia kuormia voidaan arvioida staattisen pyöräkuorman perusteella käyttämällä sysäyslisäksi kutsuttua kerrointa. (Kalliainen et al. 2014, s. 24). Ratahallintokeskus (2002) on määrittänyt suurimmaksi sallituksi dynaamiseksi pyöräkuormaksi 200 kN. Suurin sallittu pyöräkuorma riippuu kuitenkin radan päällysrakenteesta ja sallitusta nopeudesta. Lähteessä Ratahallintokeskus (2002) on esitetty myös, että dynaaminen kuorma hyväkuntoisella radalla on 1,5...2 -kertainen staattiseen akselipainoon nähden.

Kuten aiemmin todettiin, dynaamisia kuormia voi aiheutua monista rakenteesta tai kalustossa esiintyvistä poikkeavuuksista johtuen. Pystysuuntaisia dynaamisia kuormituslisiä syntyy tyypillisesti esimerkiksi lovipyöristä ja roikkuvista pölkyistä (Nielsen & Igeland 1995).

Lovipyörä on etenkin tavarajunille tyypillinen pyörän geometriavirhe, joka voi aiheuttaa huomattavan dynaamisen kuorman lisääntymisen. Lovipyörät syntyvät, kun junan jarruttaessa jarrut lukkiutuvat tai jarrut ovat jääneet päälle liikkeelle lähdeäessä. Tällöin pyörän kulkupintaan syntyy tasainen kohta, joka häiritsee pyörän normaalia kulkua kiskolla. Lovipyörä aiheuttaa pyöriessään dynaamista pystysuuntaista kuormitusta, jonka suuruus

riippuu loven syvyydestä ja junan nopeudesta. (Lahti 2008, s. 19; Nielsen & Igeland 1995, s. 835-836). Kuvassa 3.13 on esitetty lovipyörästä syntyvä voimakuvaaaja.



**Kuva 3.13** Lovipyörän voimakuvaaaja (Lahti 2008, s. 65)

Kuvaajasta voidaan selvästi havaita lovipyörän aiheuttama kuormituspiikki. Kuormitus on kasvanut tässä tapauksessa lähes kaksinkertaiseksi lovipyörän vuoksi. Aiheutunut kuormituspiikki on hyvin lyhyt. Kuormituslisäyksen suuruuteen vaikuttaa myös se, osuuko pyörässä oleva lovi kiskoon pölkyn kohdalla vai pölkkyjen välissä. (Lahti 2008)

### 3.3.3 Poikittaiskuormat

Poikittaiskuormat ovat vaakasuuntaisia voimia, jotka vaikuttavat samansuuntaisesti pölkkyjen pituusakselin kanssa. Poikittaissuuntaisia kuormia on vaikeampi määrittää ja ennakoita kuin pystykuormia johtuen esimerkiksi telirakenteista ja junan vaunujen kulkureitien eroavaisuuksista kaarteissa. (Selig & Waters 1994, s. 2.14; Esveld 2001, s. 59).

Poikittaiskuormia ratarakenteelle aiheuttavat ulkokiskon laippakosketus kaarteissa, keskipakoisvoima, sivutuuli ja dynaamisten kuormituslisäysten vaakakomponentit (Esveld 2001, s. 59). Poikittaiskuormia voi aiheutua myös lämpötilan noustessa. Kiskon lämpölaajentuessa se pyrkii nurjahtamaan, mikä aiheuttaa poikittaiskuormaa ratarakenteelle. (Selig & Waters 1994, s. 2.14)

### 3.3.4 Pitkittäiskuormat

Pitkittäiskuormat ovat radan pituussuuntaisia kuormia, jotka vaikuttavat samassa suunnassa kuin kiskot. Pitkittäiskuormia aiheutuu junan kiihdyttäessä ja jarruttaessa, kiskojen lämpölaajenemisen- ja kutistumisen vuoksi sekä kiskojen vaeltamisesta johtuen. (Esveld 2001, s. 61; Selig & Waters 1994, s. 2.14).

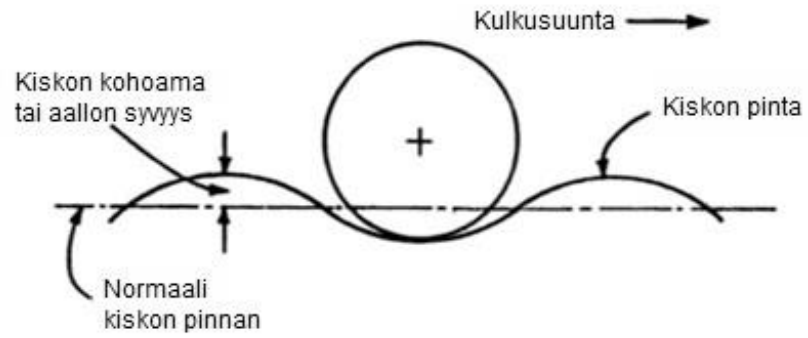
Lämpötilan muutokset aiheuttavat kiskoihin veto- ja puristusjännityksiä. Yhden asteen muutos lämpötilassa voi aiheuttaa 20 kN muutoksen kiskossa vaikuttavassa pitkittäisvoimassa (Lichtberger 2005, s. 42). Näiden jännitysten aiheuttamia muodonmuutoksia pyritään ehkäisemään jatkuvakiskoraiteella kiinnittämällä kiskot kiskonkiinnikkeillä tiukasti ratapölkkyihin. Lyhyt- ja pitkäkiskoraiteilla kiskon pituus voi muuttua vapaammin, sillä kiskon pätkien välit on jätetty avonaisiksi ja muodonmuutokset voivat tällöin tapahtua kiskon päissä (Esveld 2001, s. 171). Lämpötilanmuutokset voivat aiheuttaa kiskon katkeamisen vetojännityksen vuoksi tai niin sanotun hellekäyrän kiskon lämpölaajentuessa voimakkaasti. (Esveld 2001)

Junan pyörät aiheuttavat pitkittäiskuormia junan liikkuessa radalla. Junan kiihdyttäessä pyörän eteen syntyy vetojännitystä ja pyörän taakse puristusjännitystä pyörän ja kiskon välisestä kitkasta johtuen. Junan jarruttaessa puristusjännitys syntyy jarruttavan pyörän eteen ja vetojännitys pyörän taakse. Jarrutuksesta syntyvien voimien suuruudet riippuvat kaluston ominaisuuksista ja akselipainoista. Lichtbergerin (2005) mukaan jarruvoimat voivat olla sähkövetureilla 12–15 % akselipainoista, diesel-vetureilla jopa 18 % ja kaksiakselisilla tavaravaunuilla jopa 25 % akselipainosta. Kiihdytyksen ja jarrutuksen aiheuttamat pitkittäiskuormat voivat olla suurempia kuin lämpötilan aiheuttamat jännitykset kiskoissa. (Lichtberger 2005, s. 43)

Radan virumiseksi kutsutaan radan asteittaista siirtymistä kulkusuuntaa kohti. Siirtyminen voi olla joko kiskon siirtymistä pölkkyihin nähden tai kiskojen ja pölkkyjen siirtymistä tukikerrokseen nähden. Mäessä rata viruu alaspäin riippumatta liikenteen suunnasta. Jos liikennettä on radalla molempiin suuntiin, on viruminen vähäisempää. Kiskojen tai raiteen liikkuminen kasvattaa radan pitkittäiskuormia. (Esveld 2001, s. 61-62)

Vaziranin ja Chandolan (2006, s. 568-569) mukaan radan virumiselle on löydettävissä monia syitä. Viruminen voidaan selittää esimerkiksi kiskon aaltoilulla junan ylityksen yhteydessä. Lähestyvä pyöräkuorma pidentää kiskoa, jolloin kisko pyörän edellä nousee, sillä kiskon leikkausvastus on pienempi pyörän edellä kuin pyörän alla. Pyörän ohitettua myös sen taakse jäävän kiskon osuus kohoaa. Aaltoilua on havainnollistettu kuvassa 3.14. (Esveld 2001, s 61-62)





**Kuva 3.14** Havainnekuva kiskon aaltoilusta. (muokattu lähteestä Vazirani & Chandola 2006, s. 569)

Radan viruminen voidaan estää kiskonkiinnikkeillä, joilla saadaan aikaan riittävä puristusvoima. Myös tukikerroksen leikkausvastuksen tulee olla riittävä. (Esveld 2001, s. 62)

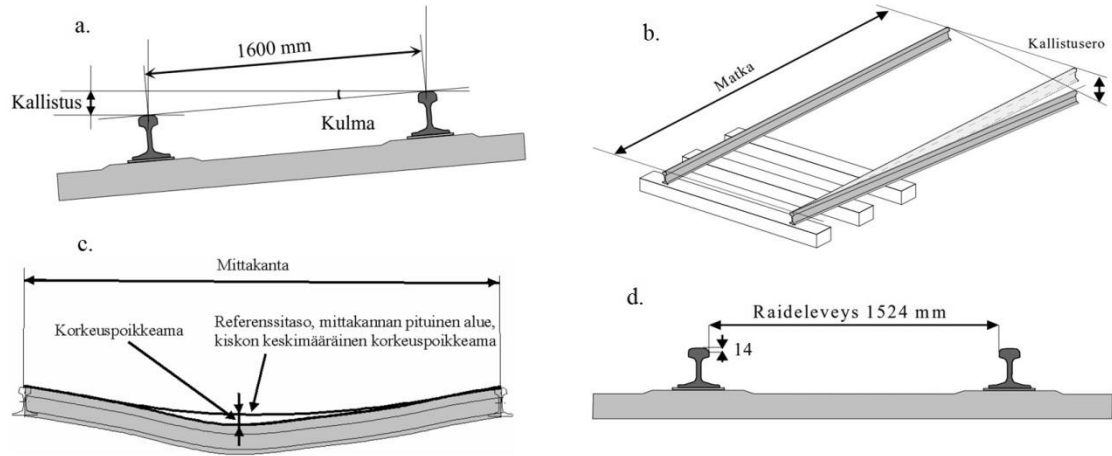
## 4. RADAN KUORMITUSKESTÄVYYSMITOITUKSESSA TARVITTAVAT LÄHTÖTIEDOT

### 4.1 Geometriavirhehistoria

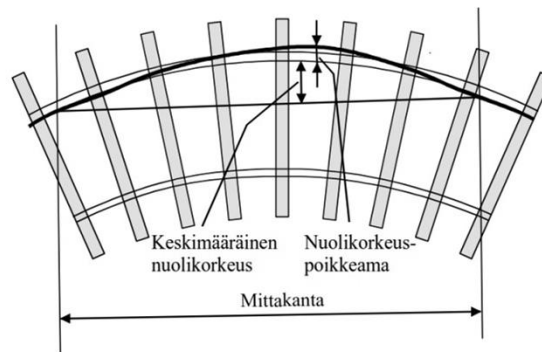
Radantarkastuksilla varmistetaan liikenteen turvallisuus ja radan käytettävyys. Radantarkastuksessa löydetään virheitä ja puutteita, jotka vaativat välitöntä korjausta tai jotka voivat ajan myötä pahentua ja vaarantaa liikennöinnin turvallisuuden. Radantarkastusten avulla kunnossapitotöitä voidaan kohdistaa oikein. Radantarkastuksia tehdään radantarkastusvaunulla, silmämääräisesti liikkuvasta kalustosta sekä kävelytarkastuksin. Näiden lisäksi vaihteet tarkastetaan erikseen. (Ratahallintokeskus 2004, s. 15, 18)

Radantarkastusten määrä määräytyy radan kunnossapitotason mukaisesti. Kunnossapitotasoon vaikuttavat liikenteelliset tarpeet, päällysrakenteet ja maksiminopeus. Pääraiteilla tarkastusvaunun mittaustiheys on 2–6 kertaa vuodessa. Liikkuvasta kalustosta tehtävä tarkastus tehdään 1–6 kertaa vuodessa ja kävelytarkastus 1–3 kertaa vuodessa. (Ratahallintokeskus 2004, s. 15, 18). Suurimmat sallitut tarkastusnopeudet vaihtelevat rataluokittain 60–120 km/h (Ratahallintokeskus 2005, s. 2).

Suomessa radantarkastuksessa käytetään radantarkastusvaunua Ttr1 51 eli EMMA-vauunua (Ratahallintokeskus 2005). Tarkastusvaunu mittaa raiteen geometristä kuntoa. Mitattavia suureita ovat raideleveys, kallistus, korkeuspoikkeama, kierous ja nuolikorkeus. Raideleveys (RL, RLK) kuvaa kiskojen kulkureunojen pienintä etäisyyttä 14 mm kiskon selän alapuolella ja on Suomessa 1524 mm. Kallistus (KALS) tarkoittaa raiteen kiskojen kulkupintojen korkeuseroa tai kiskojen kulkupintojen ja vaakasuoran horisontin välistä kulmaa. Korkeuspoikkeamalla (KPO, KPV) tarkoitetaan kiskon kulkupinnan korkeussuuntaista poikkeamaa keskimääräiseen raiteen korkeustasoon verrattuna. Raiteen kierous (KIER) määritetään mittaamalla kahdesta kohdasta mitattua vierekkäisten kiskojen kallistuseroa, kun mittauspisteet ovat määritetyllä etäisyydellä toisistaan. Nuolikorkeus (NKO, NKV) kuvaa kiskon suurinta sivupoikkeamaa suorasta, mittakannan pituisesta jänteestä. Nuolikorkeuspoikkeamalla tarkoitetaan kumman tahansa kiskon poikittaisuuntaista poikkeamaa keskimääräisestä nuolikorkeudesta. Suoralla nuolikorkeuden arvo on nolla. Mitattavia geometriavirheitä on havainnollistettu kuvissa 4.1 ja 4.2. (Ratahallintokeskus 2004, s. 7-19)



**Kuva 4.1** Radantarkastuksessa havaittavat geometriavirheet: a. kallistus, b. kierous, c. korkeuspoikkeama, d. raideleveys (Ratahallintokeskus 2004)



**Kuva 4.2** Nuolikorkeuspoikkeama (Ratahallintokeskus 2004, s. 10)

Radantarkastusvaunun mittaustuloksista saadaan tarkastuskäyrä, virhelistaus sekä erilaisia yhteenvedoja ratakilometreittäin, vaihteittain ja koko tarkasteluosuudesta. Tarkastuskäyrällä esitetään mitattavat suureet graafisesti (kuva 4.3). Tarkastuskäyrässä oikea kisko on aina oikea kisko jono kasvavien kilometrien suuntaan riippumatta ajosuunnasta mittauksen aikana. Mitattavien suureiden lisäksi tarkastuskäyrätulosteessa on merkitty vaakaviiva 100 m välein sekä kilometripylväät ja muut erikoiskohteet, kuten esimerkiksi vaihteet, sillat ja tasoristeykset. (Ratahallintokeskus 2005)



ylittyy. Ajonopeus ja -suunta eivät vaikuta virheiden suuruuteen. Lyhyet, iskumaiset virheet eivät myöskään vaikuta tuloksiin, sillä mittauspyöriä puristetaan sekä vaaka- että pystysuuntaisilla voimilla kiinni kiskoon. (Ratahallintokeskus 2005, s. 8-9, 16; Ratahallintokeskus 2004, s. 19)

Virhelistauksessa esitetään taulukkomuodossa ratakilometrillä esiintyvät virhesuureet ja erikoiskohteet, niiden sijainti, pituus sekä virheen maksimiarvo ja sen sijainti, virheluokka ja kunnossapitotaso. Kilometriyhteenvedossa esitetään taulukkomuodossa kunkin mitatun suureen virhemetrimäärät jokaisella kilometrin sisältämällä 100 metrillä tai vaihteen osalla. Yhteenlaskettujen D-virhemetrimäärien perusteella ratakilometrille annetaan arvosana epätyydyttävästä kiitettävään. Yksikin \*-luokan virhe laskee ratakilometrin arvokseen tyydyttäväksi tai epätyydyttäväksi. (Ratahallintokeskus 2005, s. 12-14)

Radantarkastusmittauksissa havaitut virheet voivat syntyä useista syistä. Tyypillisiä syitä virheiden syntymiselle ovat esimerkiksi routanousun aiheuttamat muutokset ratapenkeereissä sekä rakennekerrosmateriaalien hienonemisesta johtuva tiivistyminen ja muodonmuutokset. Havaittuja virheitä korjataan radan kunnossapidon yhteydessä tukemalla.

Kuormituskestävyysmitoituksen kannalta on tärkeää tarkastella virheiden toistuvuutta. Samojen virheiden toistuminen samalla paikalla kielii syvemmästä ongelmasta, joka voi johtua esimerkiksi kuivatusongelmista tai puutteellisesta kuormituskestävyydestä. Radantarkastustuloksia kannattaakin tarkastella esimerkiksi kymmenen vuoden ajalta. Visuaalisesta esityksestä voidaan huomata virheet, jotka toistuvat pian uudestaan tukikerroksen tukemisen jälkeen.

## 4.2 Kokonaisjäykkyys

Radan jäykkyydellä kuvataan yleisesti ratarakenteessa liikennekuormituksesta aiheutuvia palautuvia painumia. Radan kokonaisjäykkyyden voidaan olettaa olevan yksi keskeinen radan kuormituskestävyyttä kuvaava indikaattori. Ratarakenteen voidaan olettaa kestävän toistuvaa liikennekuormitusta sitä paremmin, mitä pienempiä palautuvia painumia liikennekuormat aiheuttavat. Radan jäykkyys rakentuu yksittäisten rakenneosien jäykkyyksien perusteella. (Luomala et al. 2015, s. 9; Peltokangas et al. 2013, s. 10)

### 4.2.1 Pistemäiset mittausmenetelmät

Radan jäykkyyttä voidaan mitata useilla tavoilla. Mittaustavat voidaan jakaa pistemäisiin ja jatkuviin mittauksiin. Peltokangas et al. (2013) on raportissaan esitellyt Suomessa ja maailmalla käytettyjä jäykkyyden mittausmenetelmiä. Pistemäisiä jäykkyyden mittausmenetelmiä ovat esimerkiksi pudotuspainolaite, mittausvaunut, lasersovellukset, geofonit, kiihtyvyyden- ja siirtymäanturit sekä videokuvaukset. Näistä mittausvaunujen saatavuus estää menetelmän käytön Suomessa. Lasersovellukset taas ovat herkkiä säälle ja sateelle

sekä tärinälle, mikä hankaloittaa niiden käyttöä Suomen olosuhteissa. (Peltokangas et al. 2013)

Pudotuspainolaitetta (PPL) käytetään kantavuuden mittaamisessa etenkin tiekohteissa. Pudotuspainolaitetta voidaan hyödyntää myös rataympäristössä. Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate perustuu kuormituslevyyn, jonka päälle pudotetaan vapaasti putoavaa painoa, joka kuormitta rakennetta hetkellisesti noin 50 kN:n voimalla. Rakenteen painuma mitataan geofoneilla tai kiihtyvyysantureilla useista pisteistä. Mittaustuloksista määritetään rakenteen taipumasuppilo, jonka avulla voidaan laskea eri rakennekerrosten jäykkyyksiä. PPL-mittauksia voidaan tehdä kevyillä, kannettavilla mittalaitteilla tai raskaammilla mittalaitteilla. Kannettavien mittalaitteiden keveyden vuoksi niiden avulla voidaan selvittää vain rakenteen pintakerrosten ominaisuuksia. (Kalliainen et al. 2011, s. 29-30). Pudotuspainolaitteen etuja ovat laajat käyttökokemukset tieympäristöstä ja laitteiden saatavuus. Pudotuspainolaitteella voidaan mitata vain yksi pölkky kerrallaan, joten kattavan mittausdatan kerääminen on hidasta. Mittaukset suoritetaan tyypillisesti pölkystä, jonka kiskonkiinnikkeet on avattu, mikä hidastaa mittauksia edelleen. (Peltokangas et al. 2013, s. 71)

Geofonit ovat elektromagneettisia seismometrejä. Geofonit kiinnitetään tyypillisesti pölkkyihin, joista ne mittaavat nopeutta ja tuottavat sähköistä signaalia, joka on usein nopeuteen verrannollinen jännite. Jännitteestä voidaan laskennallisesti selvittää radan taipuma. Signaalin käsitteleminen käyttökelpoiseksi vaatii jonkin verran työtä. Mittaus ja signaalinkäsittely aiheuttavat mittausvirheitä, jotka voidaan kuitenkin ennakoida tai poistaa. Geofonimittausten etuna on se, että mittalaitteiden asennus on helppoa ja samalla mittauksella voidaan mitata useampia pölkkyjä. (Peltokangas et al. 2013, s. 83-87)

Peltokangas et al. (2013) on raportissaan tutkinut radan pystysuuntaisen jäykkyyden mittaamista pistemäisesti kiihtyvyys- ja siirtymäantureilla sekä videokuvauksella. Kiihtyvyysanturit kiinnitetään ratapölkkyihin, joista ne mittaavat kiihtyvyyttä. Kiihtyvyydestietoista saadaan kahdesti ajan suhteen integroimalla siirtymä. Kuten geofonimittauksilla, myös kiihtyvyysantureilla voidaan mitata useita pölkkyjä samanaikaisesti. Pehmeillä pohjamailla tärinä voi häiritä mittaustarkkuutta. Kiihtyvyysanturidatan tulkinta voi olla melko vaativaa. (Peltokangas et al. 2013, s. 88-91)

Siirtymäanturit kiinnitetään kiskoon tai pölkkyyn, joista ne mittaavat sähköisesti tai optisesti siirtymää referenssipisteen suhteen. Referenssipiste on tyypillisesti ratarakenteeseen asennettu, liikkumaton tanko, joka ulottuu tiiviiseen pohjamaahan asti. Juuri liikkumattoman referenssipisteen tarve on siirtymäanturimittausten heikkous, sillä tankojen asentaminen on työlästä ja vaatii raidevarauksen. Siirtymämittarit eivät aina kestä Suomen ankaria sääoloja, mikä aiheuttaa epävarmuutta mittauksiin. Toisaalta siirtymäantureiden käytöstä on laajaa käyttökokemusta, antureita on helposti saatavilla ja mittaustulokset ovat käytössä ilman suurempaa jatkokäsittelyä. (Peltokangas et al. 2013, s. 91-94)

Radassa tapahtuvien taipumien ja siirtymien mittaaminen kameroilla on myös mahdollista. Kameran sovelluksissa kiinnitetään ratapölkkyyn kohdelevy, jota kuvataan kauempaa videokameralla. Kameran eteen voidaan asettaa kaukoputki, jotta kamera saadaan asetettua riittävän kauas radasta liikennetärinän ulottumattomiin. Kohdelevyn avulla voidaan määrittää radassa tapahtuvat siirtymät. Kameramittausten etuna on laitteiden helppo saatavuus sekä kenttämittausten helppous. Menetelmän käyttöä rajoittaa videokameroiden ominaisuudet, jotka eivät usein ole riittävät nopeiden junien mittaamiseen. Myös liikenteestä aiheutuva ääriä voi olla merkittävä haitta mittaukselle. (Peltokangas et al. 2013, s. 94-97)

#### **4.2.2 Jatkuvatoiniset mittausmenetelmät**

Jatkuvatoimisten menetelmien etuna on jatkuvan mittausdatan tuottaminen laajaltakin alueelta. Jatkuvatoinisia menetelmiä ovat esimerkiksi radantarkastusvaunut sekä useat oskilloivaan massaan tai geometrian mittaamiseen perustuvat menetelmät. Oskilloivaan massaan perustuvia menetelmiä on kehitetty esimerkiksi Ruotsissa ja Ranskassa. Geometriaan perustuvia menetelmiä taas on kehitetty ainakin Yhdysvalloissa, Kiinassa, Tšekissä ja Sveitsissä. Näitä menetelmiä ei kuitenkaan ole käytössä Suomessa. Peltokangas et al. (2013) on tarkastellut näitä oskilloivaan massaan ja geometrian mittaamiseen perustuvia menetelmiä tarkemmin raportissaan. (Peltokangas et al. 2013)

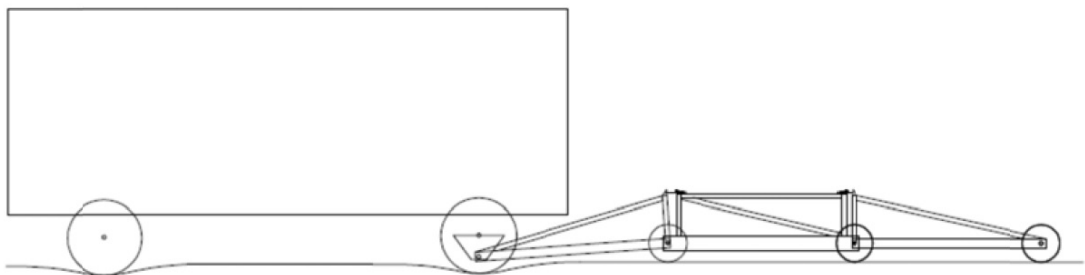
Radantarkastusvaunut mittaavat radan jäykkyyttä korkeuspoikkeaman avulla. Suomessa käytettävä radantarkastusvaunu EMMA suorittaa korkeuspoikkeaman mittauksen mitatausteliien avulla käyttämällä 5 metrin laskennallista mittakantaa. Mittakannan pituudesta riippuen mittauksessa ei välttämättä huomata kuin osa pitkäaaltoisesta epätasaisuudesta ja toisaalta pitkällä mittakannalla ei välttämättä huomata pienipiirteistä epätasaisuutta. (Peltokangas et al. 2013, s. 99-103)

Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) maa- ja pohjarakenteiden yksikössä on kehitetty jatkuvatoimista mittalaitetta jäykkyyden mittaamiseksi. Mittalaite, Stiffmaster, on kevyt-rakenteinen, kolmesta akselista koostuva vaunu, jota vedetään esimerkiksi ratakuorma-autolla (TKA). Se kiinnitetään kalustoyksikön jousittamattomaan massaan. (Luomala et al. 2015, s. 12). Mittalaite on esitetty kuvassa 4.4.



**Kuva 4.4** Jäykkyyden jatkuvatoiminen mittalaite Stiffmaster. (Ossi Peltokangas)

Mittalaitteella mitataan radan pystysuuntaisia muutoksia kalustoyksikön kuormittamana ja kuormittamattomana. Mittalaitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4.5. Mittalaitteen akseliväli on 3 metriä. Tämä akseliväli oletetaan riittävän pitkäksi, jotta kalustoyksikön aiheuttama palautuva painuma ehtii palautua ennen mittalaitteen kevyen akselin ylitystä. Radan kuormitettu pystysuuntainen geometria lasketaan kalustoyksikön akselin suhteen pitämällä mittavaunun kahta ensimmäistä akselia referenssipisteinä. Kuormittamaton geometria lasketaan mittalaitteen ensimmäisen akselin suhteen pitämällä kahta viimeistä akselia referenssipisteinä. Mittalaite tulee kalibroida ennen mittausten suorittamista. Mittaustulosten paikantamiseen käytetään pulssianturia, GPS-järjestelmää, videokuvausta ja rataympäristöä mittaavia lasereita. (Luomala et al. 2015, s. 12-15)



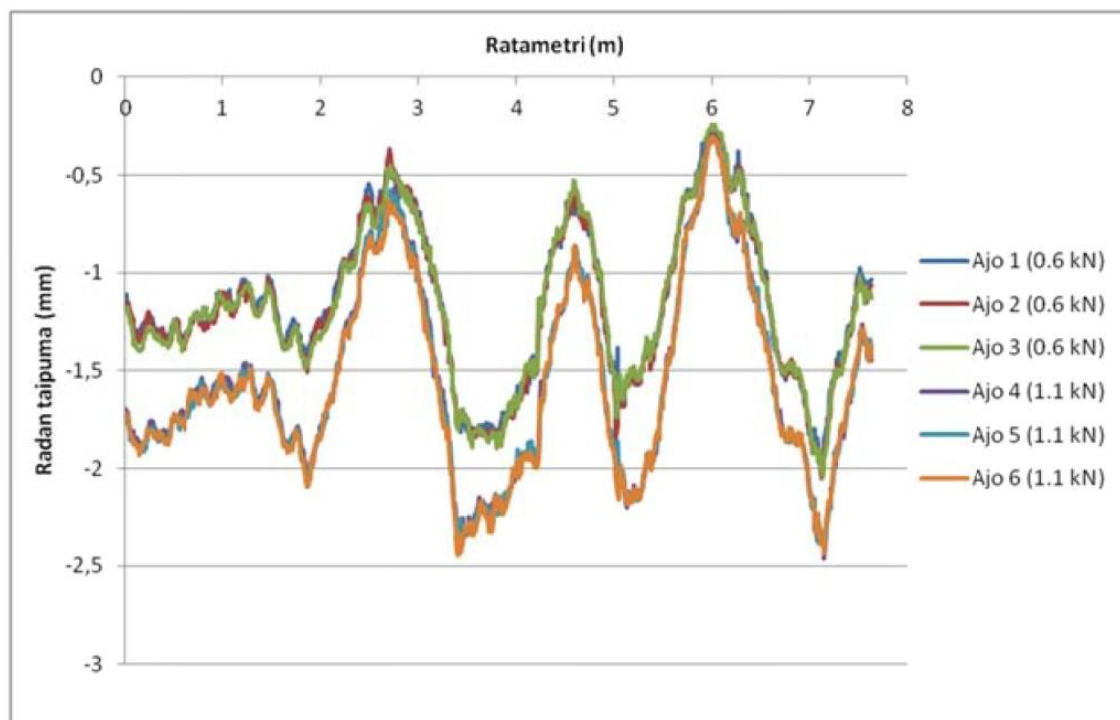
**Kuva 4.5** Jatkuvatoimisen jäykkyyden mittalaitteen toimintaperiaate. (Luomala et al. 2015, s. 13)

Mittaustulosten saaminen käyttöön vaatii datan käsittelyä, jotta esimerkiksi mittausvirheet saadaan poistettua aineistosta. Mittaustuloksista saadaan kalustoyksikön akselin aiheuttama siirtymä, josta voidaan määrittää radan taipuma. Mittausvirheitä ja mittausdatan



käsittelyä on käsitelty tarkemmin Liikenneviraston julkaisuissa 19/2015 *Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi* ja 6/2013 *Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen*.

Mittauksia voidaan suorittaa useiden kilometrien matkalta kerrallaan. Mittausajoja on tehty nopeudella 10–30 km/h useilta koeosuuksilta (Luomala et al. 2015). Mittausmenetelmän toistettavuutta on tutkittu laboratoriotesteissä ja sen todettiin olevan erinomainen (kuva 4.6).



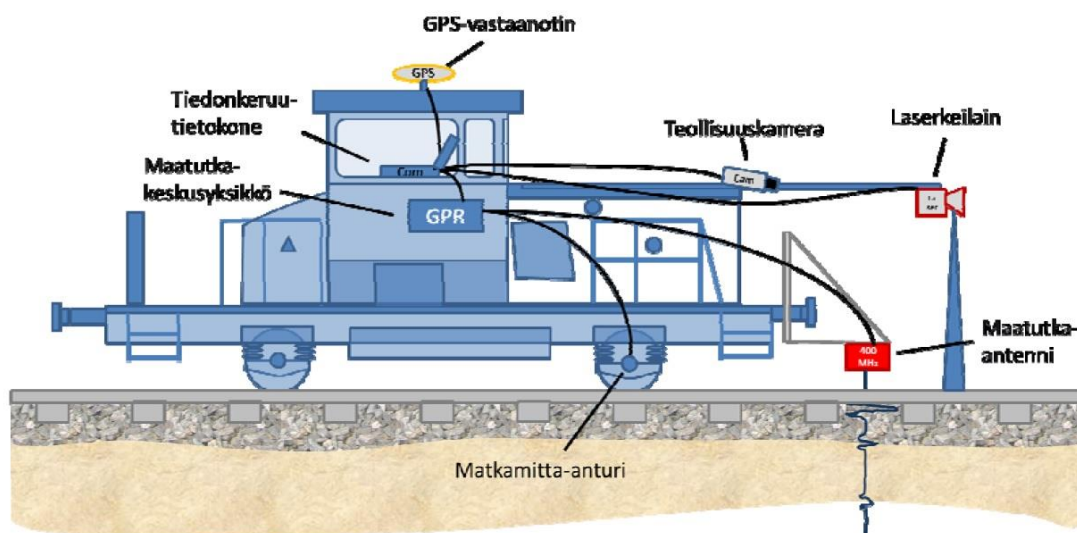
**Kuva 4.6** Jatkuvat toimisen mittalaitteen testiajot 0,6 kN ja 1,1 kN kuormituksella. (Peltokangas et al. 2013, s. 115)

Mittauksissa käytettiin kahta erisuuruista kuormitusta, 0,6 kN ja 1,1 kN. Mittaukset suoritettiin kolme kertaa kummallakin kuormituksella, jolloin kolmen peräkkäisen ajon keskihajonta oli keskimäärin 0,024 mm. (Peltokangas et al. 2013, s. 115).

### 4.3 Kerrospaksuudet

Kerrospaksuuksien tunteminen on edellytys kuormituskestävyysmitoitukselle. Uusien ratojen kerrospaksuudet on määritetty RATO 3:ssa, mutta vanhojen ratojen kerrospaksuuksista ei ole tietoa. Ajan saatossa rakennekerrokset ovat voineet sekoittua toisiinsa tai pohjamaan. Uusia rakennekerroksia on voitu myös lisätä vanhojen päälle. Myöskään pohjamaan kerrospaksuuksista ei ole usein tietoa.

Kerrospaksuuksia voidaan määrittää esimerkiksi maatutkalla. Kyseessä on ainetta rikkomaton geofysikaalinen menetelmä, jolla voidaan tutkia maaperää sekä maa- ja pohjarakenteita. Maatutkaus perustuu sähkömagneettisiin aaltoihin taajuusalueella 10–3000 MHz. Lähetinantenni lähettää aaltopulssin, joka etenee ratarakenteessa ja heijastuu lopulta materiaalien rajapinnoilta takaisin vastaanotinantenniin. Radalta saadaan jatkuva luotausprofiili tekemällä mittauksia nopeassa tahdissa peräkkäisistä pisteistä. Tyypillinen maatutkauslaitteisto on esitetty kuvassa 4.7. (Silvast & Nurmikolu 2015)

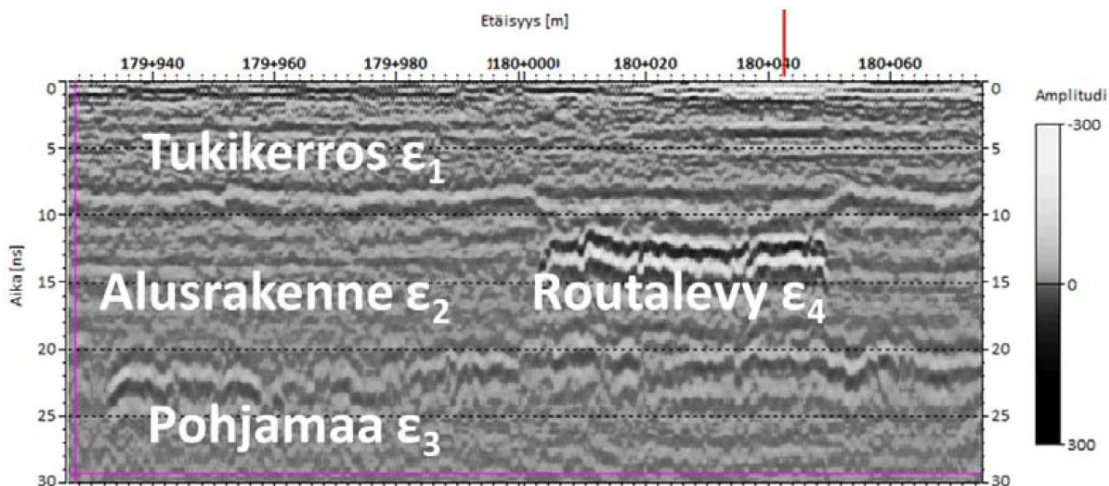


**Kuva 4.7** Tyypillinen maatutkauslaitteisto rataympäristössä. (Silvast & Nurmikolu 2015)

Maatutkauslaitteisto rakennetaan radalla liikennöivään ajoneuvoon. Laitteisto koostuu maatutka-antennista, maatutkakeskusyksiköstä ja tietokoneesta, jolla tieto kerätään talteen. Maatutkauksen paikantaminen tehdään GPS-vastaanottimella ja matkamitta-anturilla. Videokameralla kuvataan rataympäristöä. Videokuva auttaa tutkausdatan tulkinnaissa ja paikantamisessa. Laserkeilaimella keilataan rataympäristöä. Laserkeilaimella saadaan tietoa esimerkiksi ratapenkereen ja ympäristön muodoista. Laserkeilauksesta on apua tutkuskuvan tulkinnaissa yhteydessä, kun tutkakuvaa voidaan yhdistää tietoon rataympäristöstä. (Silvast & Nurmikolu 2015)

Maatutkasignaalin kulkuun vaikuttavat väliaineen sähkönjohtavuus, dielektrisyys ja magneettinen susceptibiliteetti, joka ei kuitenkaan ole merkittävä suomalaisilla maamateriaaleilla. Sähkönjohtavuus aiheuttaa signaalin vaimenemista ja mitä hienorakeisempaa maalajia tutkitaan, sitä nopeammin signaali vaimenee. Hienorakeisilla maalajeilla, kuten savella, tutkauksen syvyysulottuma on pienempi kuin karkearakeisemmilla maalajeilla. Dielektrisyys kuvaa aineen kykyä varautua ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta, eli polarisoitumista. Ilman dielektrisyysarvo on 1 ja maalajien dielektrisyysarvot vaihtelevat noin välillä 4–60. (Silvast & Nurmikolu 2015)

Maatutkausaineistosta muodostetaan tutkakuva (kuva 4.8), josta voidaan määrittää rakenneosia, kerrosrajoja ja -paksuuksia sekä pohjamaan maalajikerroksia. Tutkakuvan tulkinta vaatii ammattitaitoa. Kuvassa 4.8 on esitetty myös tutkakuvan tulkintaa. Kuvasta voidaan erottaa tukikerros, alusrakenne ja pohjamaa. Myös muut rakenteet, kuten routalevyt, voidaan paikantaa maatutkauksella.



**Kuva 4.8** Maatutkauksesta saatava tutkakuva. (Silvast & Nurmikolu 2015)

Ratapenkereen kerrospaksuuksia voidaan määrittää myös kairaamalla. Tyypillisesti maatutkauksen yhteydessä tehdään muutamia referenssikairauksia tutkakuvan tulkinnan helpottamiseksi ja tulkintojen varmentamiseksi. Kairausten tekeminen on kuitenkin hintavaa. Rataympäristössä toimiminen vaikeuttaa kairauksia, sillä aukean tilan ulottuman (ATU) sisällä työskenteleminen vaatii lupaa ja liikennekatkoa. Korkeilla ratapenkereillä ja jyrkillä pengertuilla kairausten tekeminen voi olla hankalaa.

#### 4.4 Pengermateriaalien ominaisuudet

Jotta ratapenkereen toimintaa pystyttäisiin ymmärtämään, tulisi selvittää ratapenkereessä käytettyjen materiaalien ominaisuuksia. Pengermateriaalien ominaisuudet muuttuvat ajan myötä, kun esimerkiksi tukikerroksen sepeli hienontuu tai rakennekerrokset tiivistyvät. Ominaisuudet riippuvat osittain myös penkereessä vallitsevasta kosteustilasta, joka vaihtelee vallitsevan sään mukaan.

Parhaiten pengermateriaalien ominaisuuksia voi tutkia laboratoriossa penkereestä otetuista näytteistä. Näytteet voidaan jakaa häiriintyneisiin ja häiriintymättömiin näytteisiin. Häiriintyneistä näytteistä voidaan tutkia vain maalajin rakeisuus sekä vesi- ja humuspiitoisuus tarvittaessa, sillä häiriintyneen näytteen rakenne on särkynyt. Rakeisuuden perusteella voidaan määrittää näytteen maalaji. Häiriintymätön näyte on säilyttänyt alkuperäisen rakenteensa, joten siitä voidaan tutkia myös esimerkiksi tilavuuspaino tai irtotiheys

sekä leikkauslujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuudet. Alkuperäistä jännitystilaa ei saada säilytettyä häiriintymättömässäkään näytteessä. (Rantamäki et al. 2009)

Tutkittavalta alueelta otettavilla näytteillä saadaan määritettyä laboratoriossa tarkemmin maan parametreja. Laboratoriotutkimuksiin liittyy useita virhelähteitä, joten näytteistä saatavat tulokset eivät aina vastaa todellista tilannetta. Esimerkiksi maan alkuperäisen jännitys- ja tiiviystilan säilyttäminen on haastavaa ja osin mahdotonta, jolloin saadut laboratoriokokeista saadut parametrit voivat olla virheellisiä. (Rantamäki et al. 2009)

Laboratoriokokeiden lisäksi pengermateriaalien ominaisuuksia voidaan arvioida myös kairauksilla ja maatutkauksella. Kairausten soveltuvuus sepelistä rakennetulle tukikerrokselle on kuitenkin heikko. Kairaukset eivät mittaa suoraan ratapenkereen ominaisuuksia, joten kairaustulosten tulkitseminen vaatii ammattitaitoa. Maatutkauksella voidaan mitata ratapenkereessä ja sen ympäristössä vallitsevaa kosteustilaa (Silvast & Nurmikolu 2015).

## **4.5 Pohjamaan ominaisuustiedot**

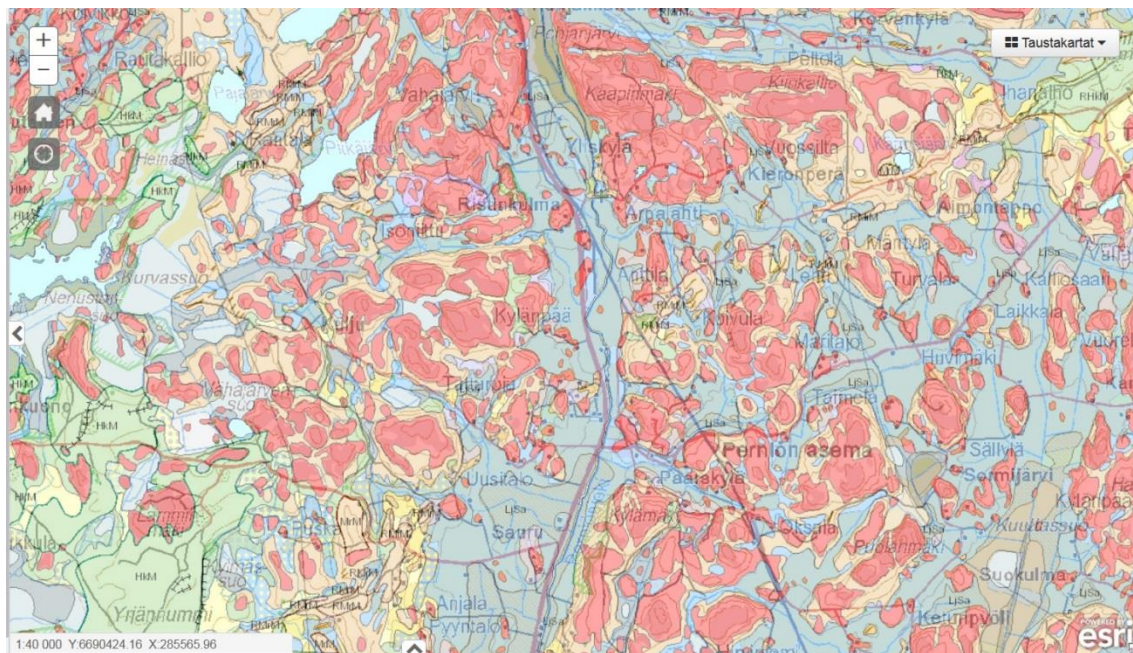
Pohjamaan ominaisuustiedot ovat olennaisia ratapenkereen toimivuuden kannalta. Pohjamaan ominaisuustietoja on kuitenkin haastavaa määrittää kattavasti laajalta tutkimusalueelta, sillä Suomen maaperä on tyypillisesti pienipiirteistä. Pohjamaan ominaisuuksia voidaan selvittää yleisluontoisesti maaperäkartan avulla ja yksityiskohtaisemmin pohjatutkimuksilla. Näitä tapoja on käsitelty tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

### **4.5.1 Maaperäkartta**

Pohjamaan maalajeista voidaan saada yleiskuva Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) ylläpitämästä maaperäkartasta. Maaperäkartta on koostettu GTK:n ja Maanmittauslaitoksen kartoitustiedoista. Koko maalle on saatavissa maaperäkartta mittakaavassa 1:200 000. Tarkemman, 1:20 000 mittakaavassa olevan maaperäkartan kattavuus vaihtelee. (GTK)

Maaperäkartalla esitetään sekä pohjamaalajeja että pintamaalajeja. Pohjamaalajit on määritetty 1 m syvyydellä maanpinnasta. Pintamaalajit on määritetty 0,4-0,9 m syvyydeltä. Pohjamaalajikuvion minimikoko on yleensä 2 hehtaaria ja pintamaalajilla 4 hehtaaria. Eri maalajit esitetään eri väreillä (kuva 4.9). Esimerkiksi punaisella merkitään kalliomaata, jonka peitepaksuus on enintään metrin. Sinisellä taas merkitään savea ja vaaleanruskealla moreenia.





**Kuva 4.9** Pohjamaalajeja maaperäkartalla. (GTK)

Maaperäkartalta saadaan selville maalaji, mutta ei kyseisen maalajin ominaisuuksia. Maalajin perusteella voidaan päätellä suuripiirteisesti pohjamaan ominaisuuksia, mutta esimerkiksi laskennallisten arvojen määrittäminen on mahdotonta. Pelkän maalajitiedon perusteella voidaan kuitenkin arvioida karkeasti esimerkiksi pohjamaan routivuutta.

## 4.5.2 Pohjatutkimukset

Tarkempia tietoja pohjamaasta saadaan kairauksilla ja näytteenotoilla. Näiden menetelmien heikkoutena on tutkimusten pistemäisyys, joka ei mahdollista jatkuvan pohjamaatiedon saamista. Kairauksen tekeminen on hintavaa ja hidasta, etenkin jos tutkittava rataosuus on pitkä. Myös kairavaunujen saaminen tutkimuspaikalle voi olla maastosta johtuen hankalaa.

Kairaustapoja on monenlaisia ja niistä tulisi valita kyseiselle pohjamaalajille soveltuva kairaustapa. Tässä valinnassa voidaan käyttää apuna maastokatselmusta tai GTK:n maaperäkarttaa. Kairausmenetelmissä kairan kärkikappaletta tungetaan maahan kairatangon tai -putken avulla. Kairauksen aikana mitataan kairausvastusta, jonka avulla voidaan päätellä maalajien ominaisuuksia. Kairauksilla pyritään selvittämään maalajikerrokset, niiden laatu, tiiveys sekä lujuus ja kantavuus. Koska kairauksissa ei mitata suoraan maalajien ominaisuuksia, vaativat kairauksien tulokset ammattimaista tulkintaa. Suomessa tyypillisiä kairaustapoja ovat esimerkiksi painokairaus ja puristin-heijarikairaus kitkamaalajeille sekä siipikairaus koheesiomaalajeille. (Rantamäki et al. 2009)

Vanhoilta radoilta on voitu tehdä kairauksia rakennusvaiheessa, mutta kairaustietojen saaminen digitaaliseen muotoon on vaikeaa. Ennen rakentamista tehdyt kairaukset eivät

välttämättä anna luotettavaa kuvaa pohjamaan ominaisuuksista, sillä ratapenkereen aiheuttama kuormitus tiivistää ja lujittaa pohjamaata.

Paras tapa pohjamaan ominaisuuksien määrittämiseen on laboratoriotutkimukset pohjamaasta otetuista näytteistä. Näytteitä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.4.

## 5. KUORMITUSKESTÄVYYSMITOITUKSEN LÄHESTYMISTAPOJA

### 5.1 Odemarkin kantavuusmitoitus

Ruotsalainen Nils Odemark kehitti vuonna 1949 tierakenteen mitoitusteorian, joka perustuu kimmoteoriaan. Menetelmä sisältää useita yksinkertaistuksia ja oletuksia verrattuna aiemmin käytettyihin menetelmiin, jotta tarvittavat laskelmat yksinkertaistuisivat. Alkuperäistä, vuonna 1949 julkaistua menetelmää on sittemmin paranneltu ja sitä käytetään edelleen. (Hartikainen & Jämsä 1986; Odemark 1949)

Odemarkin menetelmää käytettäessä väylärakenteen mitoittamiseen tapahtuu kantavuuden avulla. Kantavuus muodostuu väylän rakennekerrosten ja paikoin myös pohjamaan kantavuusominaisuuksista. Väylärakenteen kantavuudella kuvataan koko rakenteen kokonaisjäykkyyttä. Rakenteen kantavuus mitataan levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella, jotka mittaavat rakenteen joustoa kuorman vaikutuksesta. Kantavuuden on todettu olevan käyttökelpoinen, epäsuora menetelmä kuormituskestävyyden kuvaamiseksi. (Kalliainen et al. 2011, s. 26). Kantavuudella ei sellaisenaan kuvata rakenteen kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia, kuten usein ajatellaan. Kantavuutta voidaan kuitenkin käyttää kuvaamaan kuormituskestävyyttä luonnonmateriaaleista rakennetuilla rakenteilla. Esimerkiksi stabiloiduilla rakenteilla kantavuus voi olla suuri, mutta rakenne voi silti olla hauras.

Odemarkin menetelmä perustuu tien rakenteessa käytettyjen materiaalien jäykkyyssmoduuleihin. Jäykkyyssmoduulit määritetään levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella. Mittaustuloksista saadaan tierakenteen E-moduuli kaavalla (Piippo et al. 1990, s. 9)

$$E = \frac{k * p * a}{s}, \quad (3)$$

jossa

$E$  on kantavuusmoduuli (MPa),

$p$  on jännitys kosketuspinnassa (kPa),

$a$  on kuormituspinnan säde (m),

$s$  on mitattu maksimipainuma (mm),

$k$  on vakio, joka riippuu maan Poisson luvun arvosta sekä mittauksessa käytettävän levyn jäykkyydestä.

Mittauksissa käytetään tyypillisesti ympyrän muotoista kuormituslevyä, jonka halkaisija on 300 mm. Tällöin kaavassa 3 olevan muuttujan  $a$  arvo on yleensä 0,15 m. Vakion  $k$

arvo on yleensä 1,5. (Piippo et al. 1990, s. 5, 9). Jännityksen arvo  $p$  kosketuspinnassa saadaan laskettua kaavalla (PANK-9001 2002)

$$p = \frac{P}{\left(\frac{\pi}{a^2}\right)}, \quad (4)$$

jossa

$P$  on maksimikuormitus (N).

Tien rakennemateriaaleille käytettävät mitoitusarvot on taulukoitu Tiehallinnon julkaisussa *Tietoa tiesuunnitteluun nro 71D*. Laskennassa käytettävät tavoitekantavuudet ja pohjamaan E-moduulit taas on ilmoitettu Tiehallinnon julkaisussa *Tierakenteen suunnittelu*. Tavoitekantavuudet on ilmoitettu kuormitusluokan ja päällystetyypin mukaan sekä päällysteen että kantavan kerroksen päältä.

Odemarkin mitoituskaava on esitetty kaavassa 5 (Tiehallinto 2004, s. 33).

$$E_p = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 * \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) * \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 * \left(\frac{h}{a}\right)^2 * \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}}, \quad (5)$$

jossa

$E_p$  on mitoittettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa),

$E_A$  on mitoittettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa),

$E$  on mitoittettavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa),

$h$  on mitoittettavan kerroksen paksuus (m),

$a$  on levykuormituslaitteen kuormituspinnan säde 0,15 m.

Yhtälön lisäehdot ovat seuraavat (Tiehallinto 2004, s. 33):

1. Lisäehto: Sitomattoman kerroksen käyttökelpoinen E-moduuli on enintään  $6 * E_A$  ja osittain sidottujen kerrosten enintään  $n * E_A$ , missä kerroin  $n$  saadaan julkaisusta *Tietoa tiesuunnitteluun 71*.
2. Lisäehto: Yhteen liimautuneet, ehjät bitumilla sidotut kerrokset, joiden  $E \geq 1500 \text{ MPa}$ , lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi otetaan osakerrosten moduulien paksuuksilla painotettu keskiarvo. Ehto voi täytyä vain, kun AB-kerrosten bitumipitoisuus on vähintään 3,8 % ja massa on asemasekoitteista. Pelkästään PAB-päällysteitä sisältävissä rakenteissa bitumipitoisuuden pitää olla vähintään 3,1 % ja E-moduulin vähintään 1400 MPa. Samassa rakenteessa olevat PAB- ja AB-kerrokset eivät ole tässä mielessä yhteen liimautuneita, vaan ne lasketaan erillisinä kerroksina.



Tien mitoituksessa Odemarkin mitoituskaavalla sitomattomat tiekerrokset jaetaan noin 200–300 mm paksuihin kerroksiin, jolloin paksut rakennekerrokset joudutaan jakamaan useampiin, pienempiin osiin. Sidotut kerrokset lasketaan tyypillisesti yhtenä kerroksena lisäehdon 2 mukaisesti. (Tiehallinto 2004, s. 32-33)

Laskenta suoritetaan kerros kerrokselta alhaalta ylöspäin. Laskennan lopuksi saadaan tierakenteen kantavuus päällyskerroksen päältä. Saatuja arvoja verrataan aiemmin taulukosta valittuihin tavoitekantavuuksiin päällysteen ja kantavan kerroksen päältä. Kerros-paksuuksia muuttamalla saavutetaan lopulta haluttu kantavuus molemmissa kohdissa.

Odemarkin mitoitusmenetelmään sisältyy useita oletuksia ja yksinkertaistuksia. Menetelmää käytettäessä oletetaan myös, että rakenteen jäykkyys kuvaa suoraan rakenteen kuormituskestävyyttä. Odemarkin menetelmässä ei voida huomioida esimerkiksi vuodenajoista aiheutuvaa vaihtelua rakenteen jäykkyydessä.

Odemarkin menetelmää ei ole sovellettu Suomessa ratarakentamiseen, vaan ratarakenteet on mitoitettu routamitoitusmenetelmällä, jolla saadaan myös kuormituskestävyyden kannalta riittävän paksut rakenteet. Odemarkin menetelmän käyttö vaatisi radan tavoitekantavuuksien määrittämistä ja ratapenkereessä käytettyjen materiaalien E-moduulien määrittämisen. Myös raiteen vaikutus kantavuuden laskennassa tulisi huomioida.

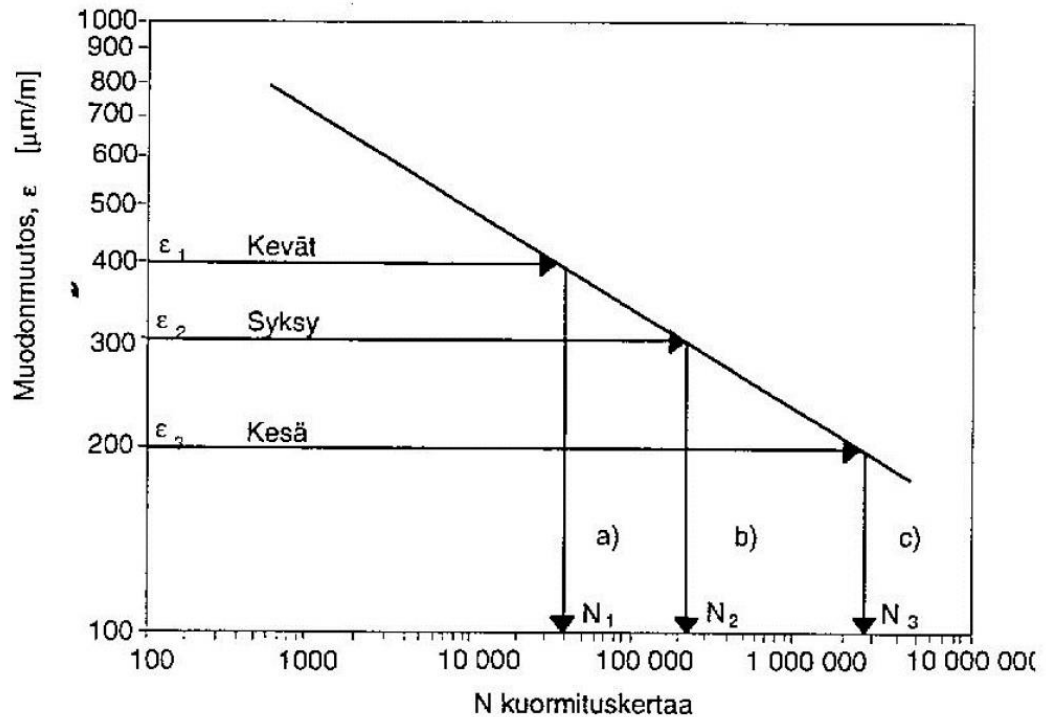
## 5.2 Analyttinen mitoitusmenetelmä

Toinen Suomessa käytettävä tierakenteen yläosan kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmä on analyttinen mitoitusmenetelmä. Analyttisessä mitoitusmenetelmässä rakenteen jännitys-muodonmuutostilan analysointiin sovelletaan yleensä monikerroslaskentaa. Rakenteen kuormituskestävyyttä arvioidaan tämän jälkeen väsymis-/kestävyyssmalleilla rakenteen kriittisiksi oletetuissa kohdissa vallitsevien jännitysten avulla. Suomessa tierakenteiden analyttiseen mitoitukseen on käytetty APAS 3 -ohjelmaa. (Tiehallinto 2004)

Tierakenteessa tapahtuu palautuvia ja pysyviä muodonmuutoksia liikenne- ja ympäristörasitusten vuoksi. Kuormituskestävyyden mitoituksessa huomioidaan vain liikennekuormista syntyvät muodonmuutokset. Tierakenteeseen kehittyvät pysyvät muodonmuutokset ovat riippuvaisia liikennemäärästä. Liikennemäärän ja pysyvien muodonmuutosten välille on mahdollista muodostaa deformatiivis- eli väsymissuoria, jotka kuvaavat suureiden välillä vallitsevaa riippuvuutta. Liikennemääränä käytetään mitoitusajanjakson kuormituskertalukua, joka on laskettu standardiakselipainon mukaan liikenne-ennusteista. Standardiakselipaino huomioi ajoneuvotyyppien erilaiset kuormitukset. Standardiakselipainoa on käsitelty aiemmin kappaleessa 2.1. (Ehrola 1996; Tammirinne 2002)

Tarkasteltavat kriittiset muodonmuutokset tierakennetta analysoitaessa ovat yleensä päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos, sitomattomien päällysrakennekerrosten yläpinnan puristusmuodonmuutos sekä pohjamaan puristusmuodonmuutos. Väsymissuorat voidaan

määrittää laboratoriossa, koetiekoneella tai empiirisesti kenttäkokeilla. Laboratoriossa ja koetiekoneella saadut väsymissuorat tulee kalibroida kenttäkokeilla. Esimerkki väsymissuorasta on esitetty kuvassa 5.1. Liikenne-ennusteiden perusteella lasketun kuormituskertaluvun perusteella voidaan väsymissuoralta määrittää tiettyä kuormituskertalukua vastaava suurin sallittu muodonmuutos. (Ehrola 1996; Tammirinne 2002).



**Kuva 5.1** Väsymissuora ja vuodenaikaisvaihtelut kuormituskestävyydessä. (Ehrola 1996, s. 228)

Muodonmuutosten suuruus riippuu myös rakennekerrosmateriaalien ominaisuuksista, kuten tiiviydestä, vesipitoisuudesta ja jännitystilasta. Rakennekerrosmateriaalien ominaisuudet eivät ole vakioita ajan suhteen, vaan esimerkiksi kosteustila vaihtelee vuoden aikana paljonkin. Tien kantavuus on tyypillisesti heikoimmillaan keväällä roudan ja lumen sulaessa. Ehrolan (1996) mukaan keväällä tapahtuva tien vaurioituminen saattaa olla jopa puolet koko vuoden vaurioitumisesta, vaikka kevään liikennemäärä on vain noin 6 % koko vuoden liikenteestä. Analyttisessä mitoitusmenetelmässä on mahdollista huomioida tämä vuodenaikaisvaihtelu Minerin kaavalla (Ehrola 1996, s. 228)

$$v = \frac{1}{\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3}}, \quad (6)$$

jossa

- $v$  on kestoikä ( $v$ ),  
 $N_i$  vuodenaikojen sallitut kuormituskertaluvut muodonmuutostasolla  $\varepsilon_i$ ,  
 $n_i$  vuodenaikajaksojen todelliset kuormituskertaluvut muodonmuutostasolla  $\varepsilon_i$ .

Tarvittavat arvot saadaan väsymissuoralta esimerkkikuvan 5.1 mukaisesti. Esimerkkikuvan 5.1 mukaisesti voidaan ajatella kesällä syntyvä muodonmuutos referenssitasoksi. Näin ollen tierakenne kestää esimerkkitapauksessa noin 3 miljoona kesäaikaista muodonmuutossykliä, mutta kevätaikaisia muodonmuutossyklejä vain noin 40 000 kappaletta. Vuodenaikaisvaihtelut voidaan huomioida laskennoissa joko kuormituskertaluvussa tai suurinta sallittua muodonmuutosta määrittäessä. (Ehrola 1996; Tammirinne 2002)

Varsinainen analyyttinen mitoitus noudattaa seuraavia vaiheita (muokattu lähteestä Tammirinne 2002):

1. Mitoitusajanjakson valinta ja mitoitusajanjakson kuormituskertaluvun määrittäminen.
2. Väsymissuoran avulla määritetään kuormituskertalukua vastaava suurin sallittu muodonmuutos tarkasteltavissa kohdissa rakennetta, yleensä päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos ja sitomattomien rakennekerrosten yläpinnan puristusmuodonmuutos.
3. Valitaan mitoittavalle rakenteelle käytettävät materiaalit ja kerrospaksuudet routamitoituksen perusteella. Määritetään valittujen materiaalien kimmomodulit ja Poisson luvut. Tyypillisimmille rakennekerrosmateriaaleille on määritetty käytettävät kimmomodulit ja Poisson luvut Liikenneviraston ohjeissa.
4. Lasketaan monikerrosohjelmalla mitoittavalle rakenteelle standardikuormasta aiheutuvat jännitykset ja muodonmuutokset.
5. Laskettuja jännityksiä ja muodonmuutoksia verrataan kohdassa 2. väsymissuorasta määritettyihin vastaaviin arvoihin. Jos laskettu muodonmuutos ylittää kohdassa 2. määritetyn arvon, tulee rakenne mitoittaa uudestaan käyttäen paksumpia rakennekerrospaksuuksia. Mikäli laskettu muodonmuutos taas on pienempi kuin kohdassa 2. määritetty arvo, voidaan mitoittaminen suorittaa uudestaan ohuemmilla rakennekerrospaksuuksilla. Rakennekerrospaksuuksia ohennettaessa tulee kuitenkin huomioida routamitoituksen määrittämät vaatimukset rakenteelle.

Analyyttistä mitoitusmenetelmää ei ole käytetty Suomessa radan suunnittelussa. Menetelmän soveltamisessa rataympäristöön on useita ongelmia. Analyyttinen menetelmä perustuu sidottujen päällysrakennekerrosten mitoittamiseen vetomuodonmuutosten perusteella, mutta myös sitomattomien rakennekerrosten deformaatiota arvioidaan pystysuuntaisten muodonmuutosten perusteella. Ratarakenteessa käytetään lähinnä sitomattomia rakennekerroksia. Ratarakenteen vaurioitumismekanismeja tulisi tutkia tarkemmin ja huomioida raiteen ja junakuormien ominaisuudet väsymissuoria määrittäessä. Rakennekerrosmateriaalien kimmomodulien ja Poisson lukujen soveltuvuutta rataympäristöön

tulisi myös tarkastella. Analyttiseen mitoitukseen itsessäänkin sisältyy monia epävarmuustekijöitä ja yksinkertaistuksia, jotka vaikuttavat tuloksiin.

### 5.3 Leikkausmuodonmuutoksiin perustuva pengerleveysmitoit- tus

Suomen ilmasto on haasteellinen ratarakentamisen näkökulmasta. Ratapenkereet mitoitetaan routamitoituksella, mikä johtaa tyypillisesti paksuihin pengerrakenteisiin. Kustannussyistä paksut penkereet pyritään rakentamaan kapeiksi ja jyrkkäluiskaisiksi materiaalin vähentämiseksi. Korkea ja kapea penger latistuu vähitellen toistuvan liikennekuorman alla ja lisää kunnossapidon tarvetta. (Kalliainen & Kolisoja 2013, s. 9)

Pengerleveysmitoituksella pyritään löytämään optimaalinen pengerleveys, joka on taloudellinen sekä rakennus- että elinkaarikustannuksiltaan. Pengerleveydellä tarkoitetaan ratapenkereen leveyttä alusrakenteen yläpinnassa, eli tyypillisesti välikerroksen yläpinnan leveyttä. Ratapenkereen leveys määräytyy radan alusrakenneluokan perusteella. Pengerleveyteen vaikuttaa myös mitoitettavan ratapenkereen sijainti suoralla tai kaarteessa. Ratapenkereiden tyypillinen luiskakaltevuus on 1:1,5. (Liikennevirasto 2014a, s. 18-19)

Kalliainen ja Kolisoja (2013) ovat tutkineet pengerleveyttä ja luiskakaltevuutta. Tutkimuksessa havaittiin, että pohjamaan jäykkyydellä on suuri merkitys ratapenkereen pitkäaikaisissa muodonmuutoksissa. Ratapenkereeseen syntyy suurempia muodonmuutoksia pehmeillä tai joustavilla pohjamailla kuin jäykällä pohjamailla. Pehmeillä pohjamailla pysyviä muodonmuutoksia syntyy riippumatta pengerleveydestä. Jäykällä pohjamailla ratapenkereeseen syntyy merkittävästi vähemmän pysyviä muodonmuutoksia. (Kalliainen & Kolisoja 2013, s. 80)

Ratapenkereessä tapahtuvat pysyvät muodonmuutokset aiheuttavat penkereen leviämistä. Pysyvät muodonmuutokset johtuvat ratapenkereen alusrakenteeseen tai pohjamaahan kohdistuvista leikkausmuodonmuutoksista, jotka aiheutuvat toistuvasta liikennekuormasta. Jäykällä pohjamaalla ja alusrakenteella liikenteestä johtuvat muodonmuutokset ovat pienempiä, jolloin myös leikkausmuodonmuutokset rakenteessa ovat pienempiä kuin joustavalla rakenteella tai pohjamaalla. Mitä suurempia leikkausmuodonmuutokset ovat, sitä suurempi osa niistä jää pysyviksi. (Kalliainen & Kolisoja 2013). Maan leikkauslujuusominaisuuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 3.1.4.

RATO 3 mukaisesti alusrakenneluokkien 0, 1 ja 4 ratojen pengerleveydet määritetään taulukkoarvoista. Alusrakenneluokilla 2 ja 3 pengerleveys mitoitetaan ratapölkyn keskeltä mitatun palautuvan pystysuuntaisen siirtymän perusteella. Vähimmäispengerleveydet luiskakaltevuudella 1:1,5 on esitetty taulukossa 5.1. (Liikennevirasto 2014a)

**Taulukko 5.1** Pengerleveyden määrittäminen alusrakenneluokissa 2 ja 3. (Liikennevirasto 2014a)

Pengerleveys [m]		Mitattu ratapölkyn pystysuuntainen palautuva siirtymä [mm]
Suoralla	Kaarteessa	
6,0 <sup>2)</sup>	6,4 <sup>1) 2)</sup>	<0,6
6,2 <sup>2)</sup>	6,6 <sup>1) 2)</sup>	0,6..0,8
6,4 <sup>2)</sup>	6,8 <sup>1) 2)</sup>	0,81..1,0
6,6 <sup>2)</sup>	7,0 <sup>1) 2)</sup>	1,01..1,2
6,8 <sup>2)</sup>	7,2 <sup>1) 2)</sup>	>1,2

- 1) Kaarrelevitystä käytetään ainoastaan kaarteissa, joiden  $R < 3000$  m, jolloin pengerlevitys tehdään kokonaisuudessaan ulkokaarten puolelle. Pengerleveys ilman kaarrelevitystä on  $R < 3000$  m kaarteessakin riittävä silloin, kun radan rakenne rajoittuu kiinteään esteeseen (laiturit, kallioleikkaukset, sillat ja tunnelit).
- 2) Siltojen päiden penkereen levennys on suunniteltava ratkaisuna, jossa pengerlevennys ulottuu 4 metrin etäisyydelle reunimmaisen raiteen keskilinjasta 10 m matkalla alkaen sillan siipimuurin päästä ja se muuttuu radan poikkileikkauksen mukaiseksi seuraavan 5 metrin matkalla.

Palautuva siirtymä mitataan ratapölkyn keskeltä Sr2-tyyppisen veturin tai akselipainoltaan vastaavan muun ajoneuvon ylityksen aikana. Mittauksen suoritetaan kesäkaudella esimerkiksi kiihtyvyy- tai siirtymäantureilla viidestä ratapölkystä viiden ratapölkyn välein. (Liikennevirasto 2014a)

Palautuvan pystysuuntaisen siirtymän oletetaan kuvaavan ratarakenteen ja pohjamaan jäykkyyttä ja sen alttiutta pysyville muodonmuutoksille. Pengerleveyden mitoittamisella pyritään hallitsemaan ratapenkereeseen ja pohjamaahan kohdistuvia leikkausjännityksiä, jotta pysyviä, haitallisia muodonmuutoksia, kuten penkereen leviämistä, voitaisiin ehkäistä. Pysyvät muodonmuutokset vaikuttavat heikentävästi radan geometriaan, jolloin radan kuormituskestävyyttä voidaan pitää puutteellisenä. Mitoittamalla pengerleveys palautuvien painumien avulla johtaa se onnistuessaan myös radan kuormituskestävyyden paranemiseen.

## 5.4 Kansainväliset menetelmät

Kuormituskestävyyksimitoitukseen perustuvia mitoitusmenetelmiä ei maailmalla juurikaan käytetä. Maailmalla käytettäviä mitoitusmenetelmiä ei myöskään voida suoraan soveltaa Suomen ankariin ilmasto-olosuhteisiin. Seuraavaksi on esitelty Saksassa käytettävää kantavuuteen perustuvaa mitoitusmenetelmää.

Saksassa yksi ratarakenteen mitoittamiseen käytettävistä menetelmistä perustuu kantavuuteen. Kantavuusmitoituksen lisäksi Saksassa käytetään myös esimerkiksi routaan perustuvaa mitoitusmenettelyä. Saksassa käytettävässä kantavuusmitoituksessa mitoitettava

parametri on alusrakenteen paksuus. Rakenteen tarkasteltavat kantavuudet ovat alusrakenteen yläpinnan ja pohjamaan pinnan kantavuus. Menetelmässä on huomioitu vuoden-aikojen vaikutus pohjamaan kantavuuteen käyttämällä mitoituksessa pohjamaan saavut-tamaa alinta E-moduulia. Kantavuus on alimmillaan keväällä. (Göbel et al. 1996, s. 176-188)

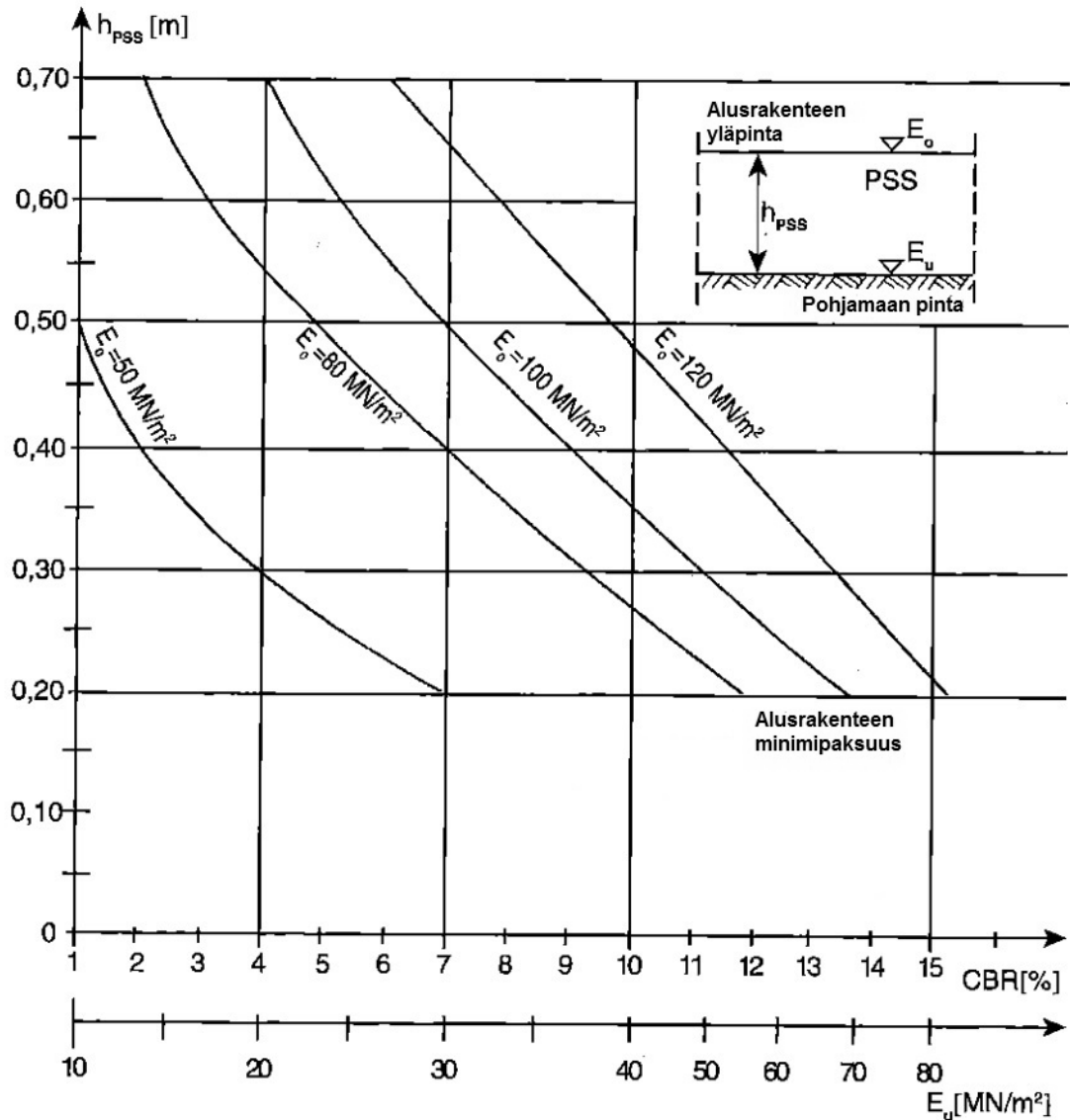
Taulukossa 5.2 on esitetty vaadittavat minimiarvot E-moduulille alusrakenteen yläpin-nassa ja pohjamaan pinnassa erilaisille radoille Göbel et al. mukaan (1996). Taulukossa on esitetty myös vaadittavat tiiviystilat alusrakenteen ja pohjamaan pinnoissa. Tiiviysaste  $D_{Pr}$  on määritetty tavallisella Proctor-kokeella (Göbel et al. 1996, s. 68-73), jonka tiivis-tysmäärä on Suomessa tavallisesti käytettyä parannettua Proctor-sullontaa pienempi.

**Taulukko 5.2** Saksalaisessa alusrakenteen mitoitusmenetelmässä vaaditut E-moduulit (minimikantavuus) ja tiivistysasteet uusille ja vanhoille radoille. (muokattu lähteestä Gö-bel et al. 1996, s. 185)

Ratatyyppe			Alusrakenteen yläpinta		Pohjamaan pinta	
			$E_{v2}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$D_{Pr}$	$E_{v2}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$D_{Pr}$
Uusi rata	Pääradan läpikulkeva pääraide (lukuunottamatta S-Bahnia)		120	1,03	80	1,00
	S-Bahnin ja Nebenbahnin läpikulkeva pääraide		100	1,00	60	0,97
	Muut raiteet		80	0,97	45	0,95
Kunnossapi- don kohteet	Olemassa oleva rata- linja	$v > 160$ km/h	80	0,97	45	0,95
		$v \leq 160$ km/h	50	0,95	20	0,93

Taulukossa ilmoitettujen pohjamaan vaatimusten on täyttyttävä, jotta alusrakenne voidaan mitoittaa. Esitetyt E-moduuli- ja tiiviysastevaatimukset asettavat rajoituksia palautuvalle painumalle. Suurimman sallitun nopeuden kasvaessa palautuville painumille asetetut vaa-timukset kasvavat edelleen, mikä johtaa korkeampiin kantavuuden ja tiiviyn vaatimuk-siin alusrakenteessa. Taulukon vaatimukset on mukautettu tiesuunnittelusta rautatiesuun-nittelun tarpeisiin, eikä vaatimusten teoreettista pohjaa tunneta kovin hyvin. (Göbel et al. 1996, s. 184-185)

Suunnittelutilanteen perusteella saadaan taulukosta 5.2 minimikantavuudet alusrakenteen yläpinnassa ja pohjamaan pinnassa. Pohjamaan minimikantavuuden ja vaaditun alusrakenteen E-moduulin perusteella määritetään tarvittava alusrakennekerroksen paksuus kuvassa 5.2 esitetyn diagrammin perusteella.



**Kuva 5.2** Saksalaisen alusrakenteen mitoitusmenetelmän diagrammi. (muokattu lähteestä Göbel et al. 1996, s. 186)

Alusrakennekerroksen minimipaksuus on 0,20 metriä. Kun pohjamaan kantavuus  $E_{v2}$  on alle 10 MN/m<sup>2</sup>, ei pohjamaan oleteta saavuttavan taulukossa 5.2 esitettyjä kantavuus- ja tiiviysvaatimuksia. Tällöin on suoritettava pohjamaan vahvistustoimenpiteitä, jotta tavoittearvot voidaan saavuttaa. Alusrakennekerroksen paksuuden ei tulisi ylittää 0,70 metriä. Kun alusrakenteen paksuus ylittää 0,40 metriä, tulisi pohjanvahvistustoimenpiteitä harkita. (Göbel et al. 1996, s. 185-187)

## 6. KUORMITUSKESTÄVYYDEN PARANTAMINEN OLEMASSA OLEVILLA RADOILLA

Olemassa olevan radan kuormituskestävyyden parantaminen voi olla haastavaa. Olemassa olevat rakenteet ja radan liikennöinti vaikeuttavat parannustoimenpiteiden toteuttamista. Jotta parannustoimenpiteet olisivat tehokkaita, tulisi ensimmäiseksi määrittää radalla ilmenevien ongelmien syyt. Seuraavissa kappaleissa on esitelty lyhyesti muutamia radan kuormituskestävyyttä parantavia toimenpiteitä.

### 6.1 Raideseppelin puhdistus ja vaihtaminen

Raidesepeleistä tai -sorasta rakennetun tukikerroksen ominaisuudet muuttuvat ajan myötä. Tukikerroksessa tapahtuu sepelin hienonemista ja rakeiden pyöristymistä, jotka lisäävät tukikerroksen tiivistymistä ja muodonmuutoksia. Tukikerroksen muodonmuutokset heikentävät raidegeometriaa ja hienontunut raidesepeleli voi aiheuttaa myös routimista. Tukikerrokseen voi pumppautua hienoaainesta alemmista rakennekerroksista. (Nurmikolu & Kolisoja 2010; Ratahallintokeskus 2000)

Tukikerroksen puhdistustarvetta arvioidaan rakeisuusluvulla. Rakeisuusluku määritetään seulomalla tukikerroksen materiaalia ja summaamalla 1, 8 ja 25 mm seulojen läpäisyprosentit. Puhdistusrajana pidetään rakeisuuslukua 90, jonka ylittyttyä tukikerroksen puhdistuksen mahdollisuus on selvitettävä. (Ratahallintokeskus 2000, s. 14)

Tukikerroksen ominaisuuksia voidaan parantaa puhdistamalla tai vaihtamalla raidesepeleliä. Vanhan tukikerroksen seulomista raidetta purkamatta kutsutaan tukikerroksen puhdistamiseksi (InfraRYL 2010). Raideseppelin puhdistus suoritetaan seulomalla tukikerroksen materiaali. Seulottavasta materiaalista poistetaan hienontunut materiaali ja tukikerrokseen palautetaan rakeisuusvaatimukset täyttävä materiaali. Samalla lisätään tarvittava määrä uutta sepelikiviainesta.

Seulominen suoritetaan sepelinpuhdistuskoneella (kuva 6.1). Kone kerää kaivuketjun avulla tukikerroksen materiaalin kuljetinhihnalle, jota pitkin kiviaines siirtyy seulontalaitteeseen. Seulottu, rakeisuusvaatimukset täyttävä materiaali palautetaan takaisin tukikerrokseen. Seulonnassa erotettu hienontunut kiviaines, seulontajäte, poistetaan radan sivulle tai kerätään kuljetusvaunuun. (InfraRYL 2010)





**Kuva 6.1** Suomessa käytettävä sepelinpuhdistuskone Plasser & Theurer RM 80. Koneen kulkusuunta on kuvassa oikealle. (Ballast Undercutter/Cleaner RM 80)

Mikäli sepelinpuhdistus ei ole enää taloudellisesti kannattavaa, voidaan tukikerros myös vaihtaa kaivamalla. Kaivaminen voidaan tehdä joko purkamatta raidetta tai purkamalla raide. (InfraRYL 2010). Erikoisrakenteiden kohdalla tukikerroksen puhdistus koneellisesti ei ole mahdollista, jolloin esimerkiksi vaihteiden, tasoristeysten ja siltojen kohdalla joudutaan turvautumaan tukikerroksen vaihtamiseen. Tukikerroksen vaihtaminen tehdään kaivinkoneella.

Sepelinpuhdistuksen tai sepelin vaihtamisen jälkeen vaaditaan vielä useita työvaiheita, jotta rata saadaan määräysten mukaiseen kuntoon. Tukikerros tulee tukea ja tiivistää, jotta raide saadaan tukevasti oikeaan asemaan. Raide tulee oikoa geometrisesti oikeaan asemaan. Tukipenger täytyy myös muotoilla määräysten mukaiseksi. (Lichtberger 2005, s. 204-207)

Huonokuntoisen tukikerroksen puhdistamisella tai vaihtamisella voi olla merkittävä vaikutus radan kuormituskestävyyteen. Poistamalla hienontunut aines sepelistä parannetaan radan kuivatusta ja ehkäistään tukikerroksen routimista ja tiivistymistä. Uuden, teräväsärmäisen sepelin lisääminen parantaa tukikerroksen ominaisuuksia, kuten jäykkyyttä (Nurmikolu & Kolisoja 2010).

## 6.2 Kuivatuksen parantaminen

Parantamalla radan kuivatusta voidaan saavuttaa merkittäviä parannuksia radan kuormituskestävyyteen. Puutteellinen kuivatus voi aiheuttaa esimerkiksi routimista sekä heikentää kantavuutta ja radan geometriaa. Tyypillinen ongelma kuivatusjärjestelmässä on huonokuntoinen sivuoja. Sivuojaassa kasvava kasvillisuus ja ojan pohjalle kerääntyvä maa-aines estävät veden virtaamista ojassa, jolloin veden poistuminen on hidasta ja ratapenkereen vesipitoisuus kasvaa. Ratahallintokeskuksen ohjeen *RAMO 15 Radan kunnossapito* (2000) mukaisesti rata-alueen sivu-, niska-, lasku-, leikkaus- ja salaojat tulee pitää puhtaana kasvillisuudesta ja esteistä, jotka estävät ja padottavat virtausta ojassa.

Radan kuivatusta voidaan parantaa poistamalla kasvillisuus ratapenkereestä, puhdistamalla tukikerroksen sepeli, perkaamalla ja puhdistamalla sivuojat, rummut ja muut kuivatusrakenteet. Mikäli radalla on myös syväkuivatusjärjestelmiä, kuten salaojaputkia, tulee myös niiden kunnosta huolehtia ja puhdistaa tai vaihtaa tukkeutuneet putket. (Licht-

berger 2005, s. 210, 257). Kasvillisuuden ja kerääntyneen maa-aineksen poistaminen parantavat pintavaluntaa, jolloin radan kuivuminen on nopeampaa ja veden poistuminen tehokkaampaa.

### 6.3 Väli- ja eristyskerroksen parantaminen

Väli- ja eristyskerroksen ominaisuudet muuttuvat toistuvien kuormitusten ja ympäristötekijöiden myötä. Kuten tukikerroksessa, myös väli- ja eristyskerroksessa tapahtuu maa-materiaalin hienonemista, joka muuttaa materiaalin käyttäytymistä. Hienontunut rakennekerros tiivistyy ja pidättää enemmän vettä kuin hienontumaton materiaali. Myös alusrakenteen tiiveystila voi muuttua penkereessä tapahtuvien muodonmuutosten, kuten penkereen leviämisen, myötä. Vinterin (2015) tekemän tutkimuksen mukaan radan rakennekerrosten tiiveydellä on merkittävä vaikutus pysyvien muodonmuutosten syntymiseen.

Alusrakennekerrosten parantaminen olemassa olevalla radalla on haastavaa. Alusrakenteen laajamittainen parantaminen onkin käytännössä mahdollista vain radan perusparannuksen aikana. Alusrakennekerroksia voidaan parantaa tiivistämällä rakennekerrokset tarvittavaan tiiveyteen, vaihtamalla maamateriaaleja tai asentamalla esimerkiksi geovahvisteita, joiden käyttöä on kuvattu seuraavassa luvussa.

### 6.4 Geovahvisteet

Geovahvisteet ovat maarakentamisessa käytettäviä, yleensä polyesteristä (PES), polypropeenista (PP) tai polyeteenistä (PE, high density HDPE) valmistettuja lujiteverkkoja, kudottuja lujitekankaita tai yhdistelmälujitteita, joissa yhdistetään useampia geovahvisteita. Lujiteverkkoja valmistetaan myös teräksestä. Geovahvisteilla voidaan parantaa kuormituskestävyyttä, sillä geovahvisteet parantavat väylän kantavuutta, niillä voidaan hallita painumia, parantaa stabiliteettia sekä rakentaa niistä lujitemaarakenteita. (Liikennevirasto 2012a, s. 19-21).

Geovahvisteita voidaan valmistaa useilla tavoilla. Lujitekankaat voidaan jakaa kudottuihin (woven) tai ei-kudottuihin (non-woven). Kudottu lujitekangas koostuu vähintään kahdesta erisuuntaisesta lankaryhmästä. Ei-kudotut kankaat muodostuvat satunnaisesti järjestäytyneistä kuiduista, jotka on sidottu toisiinsa neulaamalla tai termisesti. Yleisimmin niitä käytetään suodatinkankaina. Lujiteverkkoja valmistetaan vetämällä, hitsaamalla tai kutomalla. (Liikennevirasto 2012a, s. 20-21). Erilaisia geovahvisteita on esitetty kuvassa 6.2.



**Kuva 6.2** Ylimpänä lujiteverkko, keskellä lujitekangas ja alimpana yhdistelmälujite. (RT 38675 2015)

Geovahvisteilla on useita tehtäviä maarakenteissa. Rataympäristössä kuormituskestävyyden kannalta tärkeimpiä toimintatapoja ovat erottaminen ja lujittaminen. Lujitekankaalla tai yhdistelmälujitteella voidaan estää rakennekerrosten tai rakennekerrosten ja pohjamaan sekoittumista keskenään. Näin voidaan estää esimerkiksi hienoaineksen pumppautuminen tukikerrokseen. (Lichtberger 2005, s. 226). Indraratnan et al. (2010; 2006) tutkimuksien mukaan geovahvisten lisääminen vähentää tukikerroksen hienontumista ja leviämistä verrattuna rakenteeseen ilman geovahvistetta.

Geovahvisteet lujittavat rakennetta tasoittamalla ja jakamalla laajemmalle alueelle penkereeseen kohdistuvia kuormia. Yhtenäiset vahvisterakenteet ottavat vastaan penkereeseen kohdistuvia leikkaus- ja vetojännityksiä. Lujiteverkko estää kuormien aiheuttamaa vaakasuuntaista liikettä lukitsemalla maapartikkeleita verkon aukkoihin. Ylemmät maapartikkelit kiilautuvat näihin lukittuihin partikkeleihin ja muodostavat jäykän rakenteen. (Sara 2012)

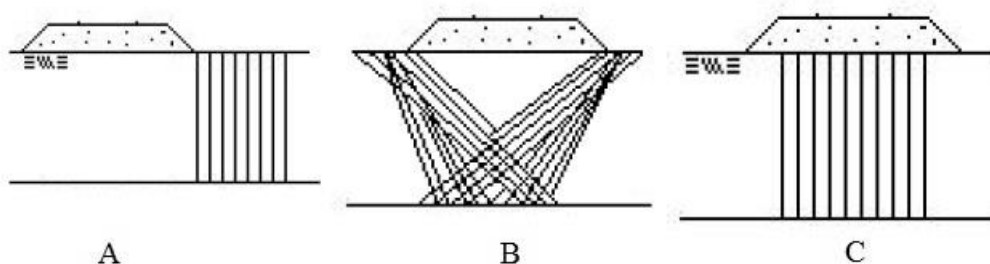
Geovahviste voidaan asentaa esimerkiksi ratapenkereen ja pohjamaan väliin tai tukikerroksen alle. Geovahvisten asentaminen olemassa olevan ratapenkereen alle on mahdollista vain radan uudelleenrakentamisen yhteydessä, sillä niiden asentaminen vaatii aina rakennekerrosten purkamista ja rakentamista uudelleen.

## 6.5 Pohjamaahan kohdistuvat toimenpiteet

Osa radalla esiintyvistä epäjatkuvuuskohdista johtuu pohjamaan ominaisuuksista. Siirryttäessä esimerkiksi pehmeältä pohjamaalta kalliioleikkaukseen, tai päinvastoin, radan kokonaisjäykkyys muuttuu. Pohjamaan kantavuus voi olla myös puutteellinen, jolloin radan geometria muuttuu esimerkiksi pohjamaassa tapahtuvien painumien vuoksi. Koko rata-penkereen stabiliteetti voi olla puutteellinen pohjamaan heikkouden vuoksi. Stabiliteetti-ongelmat voivat näkyä geometriaongelmina. Pohjamaan ominaisuudet tulee huomioida jo radan suunnitteluvaiheessa, mutta esimerkiksi akselipainojen tai nopeuksien nostaminen voi aiheuttaa ongelmia olemassa olevalla rataosalla.

Pohjamaassa esiintyviä stabiliteetti- ja painumaongelmia voidaan korjata esimerkiksi syvästabiloinnilla. Syvästabiloinnissa stabiloitavaan maamateriaaliin sekoitetaan sideainetta, joka kovettuessaan parantaa maamateriaalin ominaisuuksia. Suomessa käytettäviä syvästabilointimenetelmiä ovat pilaristabilointi ja massasyvästabilointi. Pilaristabiloinnissa maamateriaaliin syötetään ja sekoitetaan sideainetta pilarimaisesti vierekkäin ja massasyvästabiloinnissa sideainetta sekoitetaan koko stabiloitavalle alueelle. Pilaristabilointi suoritetaan pilarointikoneella, jonka sekoitinkärki upotetaan stabiloitavaan maahan. Sekoitinkärkeä nostetaan ylöspäin samalla kun maahan sekoitetaan sekoitinkärjellä syöttäen samalla maahan sideainetta. Massasyvästabiloinnissa sekoituskärkeä liikutellaan sekä pysty- että vaakasuunnassa sekoittaen sideainetta laajemmalle stabiloitavalle alueelle. Syvästabiloinnissa käytettäviä sideaineita ovat yleensä kalkki ja sementti. (Liikennevirasto 2010, s. 11-13, 17)

Syvästabilointia voidaan tehdä myös olemassa oleville radoille. Liikennekäytössä olevaa rataa stabiloitaessa tulee kuitenkin varmistaa stabiloidun massan stabiliteetti lujittumisvaiheen aikana ja selvittää lujittumisen kesto (Liikennevirasto 2014a, s. 17). Kuvassa 6.3 on esitetty kolme erilaista tapaa, joilla voidaan parantaa pohjamaan ominaisuuksia olemassa olevan ratapenkereen alla.



**Kuva 6.3** Pilaristabilointitapoja olemassa olevalle radalle. (muokattu lähteestä Smekal 2008)

Stabiliteettiongelmia voidaan korjata stabiloimalla pohjamaata ratapenkereen luiskan alareunassa (kuva 6.3, kohta A). Stabiloitu maa katkaisee mahdollisia liukupintoja ja kas-

vattaa näin ratapenkereen stabiliteettia. Stabilointi voidaan tarvittaessa suorittaa ratapenkereen molemmille puolille. Stabilointia ei tehdä ratapenkereen alle, joten stabilointitapa ei vähennä ratapenkereen alla tapahtuvia painumia. (Smekal 2008, s. 3)

Stabilointi voidaan ulottaa ratapenkereen alle tekemällä stabilointi viistosti ratapenkereen luiskan juuresta ratapenkereen alle kuvassa 6.3 esitetyn tavan B mukaisesti. Tällä tavalla suoritettu stabilointi paitsi parantaa penkereen stabiliteettia vähentää myös painumia penkereen alla. Kuten tapa B, myös tavalla C tehty stabilointi parantaa penkereen stabiliteettia ja vähentää painumia. Stabilointitapa C vaatii kuitenkin liikennekatkoa stabiloinnin ajaksi, kun taas tavat A ja B eivät häiritse liikennettä. (Smekal 2008, s. 3)

Stabiliteettiongelmien aiheuttamia geometriaongelmia voidaan ehkäistä myös vastapenkereillä. Vastapenger on varsinaisen ratapenkereen juurelle rakennettava matalampi pennger, jonka paino toimii vastapainona ratapenkereelle parantaen ratapenkereen stabiliteettia. Vastapenger voidaan rakentaa vain toiselle tai molemmille puolille ratapengertä. Vastapenkereen mitat määräytyvät stabiliteettilaskelmien perusteella. Vastapengerit eivät vähennä pohjamaassa tapahtuvia painumia, vaan voivat päinvastoin kasvattaa niitä.

Pohjamaassa tapahtuvien jäykkyysmuutosten aiheuttamia haittoja ja mahdollisia routanousueroja voidaan ehkäistä esimerkiksi siirtymäkiiloilla. Siirtymäkiila rakennetaan penkereen alle routimattomasta materiaalista pohjaolosuhteiden muutoskohtaan vähintään routimattomaan syvyyteen. Siirtymäkiila on paksuimmillaan pohjasuhteiden muutoskohdassa ja ohenee radan pituussuunnassa molempiin suuntiin. Siirtymäkiilan kaltevuus määräytyy radan alusrakenneluokan perusteella. Siirtymäkiilalla voidaan varmistaa jäykkyyden muuttuminen hitaammin pidemmän matkan aikana ja tasoittaa routanousueroja. (InfraRYL 2010)

## 6.6 Epäjatkuvuuskohtien tasoittaminen

Ratarakenteessa on useita kohtia, jotka ovat muodostavat epäjatkuvuuksia rakenteessa. Epäjatkuvuuksia muodostuu tyypillisesti kohtiin, joissa radan jäykkyys muuttuu. Näitä ovat esimerkiksi kiskojoitkokset, rummut, vaihteet ja sillan päädyt. Myös kiskoissa ja ratapölkkyissä esiintyvät viat voivat aiheuttaa epäjatkuvuuksia.

Ratakiskon jatkoskohdassa kiskon jäykkyys pienenee ja syntyy epäjatkuvuuskohta, jolloin jatkoskohtaan kohdistuu suurempia dynaamisia voimia. Kasvaneet voimat aiheuttavat geometriavirheitä, jotka voidaan havaita radantarkastuksen yhteydessä. Jatkoskohdissa esiintyviä virheitä ovat esimerkiksi kiskonpään taipuminen, kulumisen tai lohkeaminen. Jatkosten kohdalla esiintyviä epäjatkuvuuksia voidaan korjata esimerkiksi jatkosten nostamisella, jatkosten taivuttamisella, päällehitsaamalla ja oikomalla. Jos epäjatkuvuuskohdan syntymisen syynä on esimerkiksi tukikerroksesta tai ratapölkystä ja kiskonkiinnityksestä johtuva ongelma, tulee myös tukikerros, ratapölkkyt tai kiskonkiinnitykset korjata tai vaihtaa. (Ratahallintokeskus 2000, s. 22-30)

Radan pystysuuntainen jäykkyys muuttuu selvästi siirryttäessä maanvaraiselta ratapenke-reeltä sillalle. Ratapenkereessä tapahtuvat painumat ovat suurempia kuin sillalla tapahtu-vat painumat, jolloin sillan päätyihin syntyy epäjatkuvuuskohta (Esveld 2001, s. 162). Jäykkyyseroja voidaan tasata käyttämällä siirtymärakenteita sillan päässä. Siirtymälaatat ovat tyypillisesti betonisia, noin 5 metriä pitkiä laattoja. Siirtymälaatan toinen pää on kiinnitetty sillan rakenteisiin ja toinen pää tukeutuu täyttökerrokseen. (Asp 2011, s. 111; Liikennevirasto 2012c, s. 38)

Ratapenkereen läpi kulkevat rummut aiheuttavat myös muutoksia radan jäykkyydessä. Rumpujen ympärystäyttyön käytetty materiaali saattaa erota sekä raekooltaan että tiiveydeltään radan rakennekerroksista. Sekä rumpu että käytetyt materiaalit aiheuttavat epäjatkuvuutta rakenteeseen. Rummun painuminen tai taipuminen sekä halkeilu lisäävät rummun aiheuttamaa geometriavirhettä ja epäjatkuvuutta. Rumpujen kuntoa tuleekin tarkkailla säännöllisesti ja tehdä tarvittavat korjaustoimenpiteet, kuten rummun puhdistami-nen, rummun paikkaaminen, rummun perustusten parantaminen tai rummun saneeraus sujutusputkella (Ratahallintokeskus 2006).

Vaihteiden rakenne aiheuttaa epäjatkuvuuskohtia ratarakenteeseen, jolloin junasta aiheu-tuvat dynaamiset kuormat kasvavat ja aiheuttavat esimerkiksi geometriavirheitä vaihde-alueelle. Vaihdealueella esiintyy samoja geometriavirheitä kuin muuallakin rataosalla. Radalla esiintyviä geometriavirheitä on käsitelty tarkemmin luvussa 4.1. Vaihteessa esiintyviä virheitä korjataan samoin kuin muuallakin rataosalla esiintyviä virheitä, eli tu-kemalla raidesepeli alkuperäiseen asemaan, puhdistamalla tukikerros ja lisäämällä uutta sepe-liä sekä korjaamalla tai vaihtamalla vioittuneet vaihteen osat. Vaihteen puhtaudesta on myös huolehdittava. Vaihteen tukeminen on haastavampaa kuin linjaraiteen tukemi-nen, joten työssä on käytettävä nimenomaan vaihteen tukemiseen tarkoitettua kalustoa. Vaihteen teräsosia voidaan korjata hitsaamalla ja hiomalla. Taipuneet vaihdepölkkyt voi-daan korjata pölkyn alle asennettavilla lisälevyillä, mikäli pölkky on muuten hyväkuntoi-nen. Huonokuntoiset pölkkyt on vaihdettava. Vaihteen kunnossapidosta on kerrottu tar-kemmin Liikenneviraston ohjeessa *RATO 14 Vaihteiden tarkastus ja kunnossapito*. (Liik-kennevirasto 2013a)

## 7. LÄHTÖTIETOJEN VAIKUTUSSUHTEIDEN VERTAILU ESIMERKKIKOHOEESSE

Esimerkkikohteen tarkastelulla pyrittiin löytämään työkaluja kuormituskestävyyden käsittelemiselle ja havainnoimiselle. Tarkastelun avulla oli tarkoitus tutkia myös kuormituskestävyyden suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Tarkastelun ulkopuolelle jätettiin kohteet, joissa esiintyy erikoisrakenteita kuten rumpuja, vaihteita, siltoja, tunneleita tai paa-lurakenteita.

### 7.1 Esimerkkikohteen kuvaus

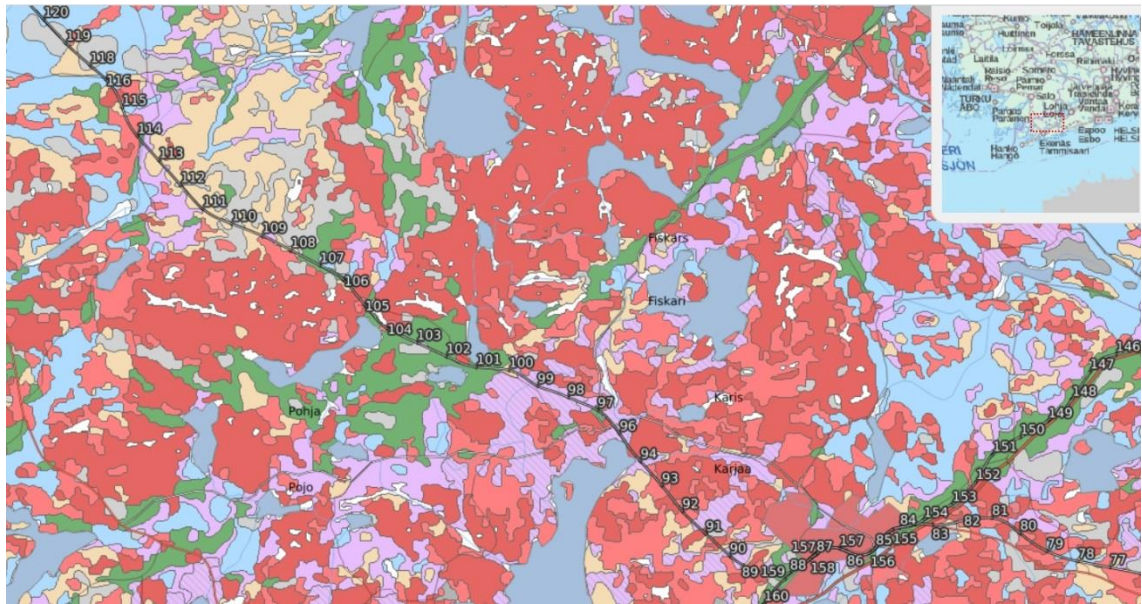
Esimerkkikohde sijaitsee rantaradalla Karjaan ja Ervelän liikennepaikkojen välillä rata-kilometreillä 87–119. Karjaan ja Ervelän välillä on myös Pohjankurun liikennepaikka. Rantaradan Turku–Karjaa -osuus on valmistunut vuonna 1899. Rataoikaisuja on tehty 1910–90 -luvuilla ja radan sähköistys valmistui 1995. Perusparannus aloitettiin 1980-luvulla ja saatiin valmiiksi 1995. (Sito Oy 2008, s. 14-15)

Esimerkkikohde on pääasiassa yksiraiteista sekaliikennerrataa, jolla liikennöi sekä henkilö- että tavarajunia. Ervelässä on kohtauspaikka, jonka kohdalla rata on kaksiraiteinen. Rata on sepelöity, betonipölkkyinen jatkuvakiskoraide, jonka kunnossapitotaso on 1A. Osuudella käytetyt päällysrakenneluokat ovat C1, C2 ja D. Suurin sallittu nopeus moot-torijunalle on 200 km/h ja veturijunalle 160 km/h. Suurin sallittu akselipaino on 225 kN. Tutkittavalla osuudella on 7 rautatietunnelia. (Liikennevirasto 2013b)

Rantaradan liikenne on pääasiassa henkilöliikennettä. Karjaa–Turku välillä oli 1 075 000 matkustajaa vuonna 2015, kun taas tavaraliikennettä oli vuonna 2015 vain 53 000 netto-tonnia. (Liikennevirasto 2016a; Liikennevirasto 2016b)

Karjaa–Ervellä -välillä maaperä on hyvin vaihtelevaa. Tässä tutkimuksessa maaperän ominaisuuksia on tarkasteltu maaperäkartan tasolla, sillä esimerkiksi tarkempia pohjatutkimuksia ei ollut käytettävissä. Esimerkkikohteen maaperäkartta on esitetty kuvassa 7.1.





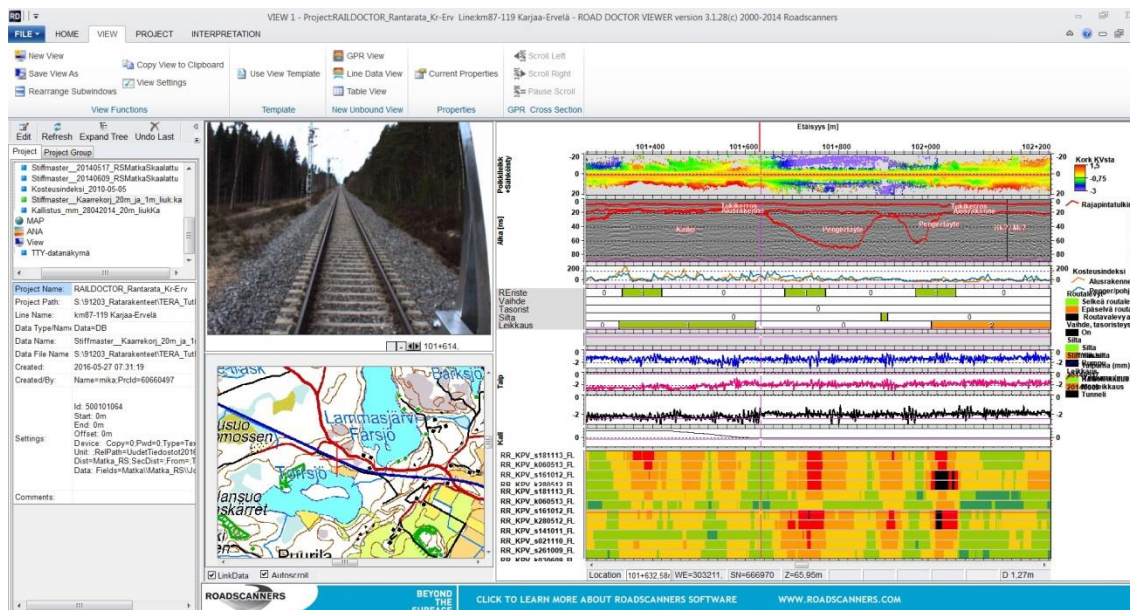
**Kuva 7.1** Esimerkkikohteen maaperäkartta (Arcus et al.)

Maaperäkartassa on kuvattu pohjamaalajit eli maalaji, jota esiintyy metrin syvyydellä maanpinnan alapuolella. Kartassa on kuvattu punaisen eri sävyillä kalliota, sinisellä savea ja liejusavea, violetilla hietaa, vihreällä hiekkaa, ruskean sävyillä moreeneita ja harmaan sävyillä turpeita ja liejua. Kartasta voidaan huomata, että tutkittavalla rataosuudella maaperän vaihtelu on suurta.

## 7.2 Lähtötiedot

Tutkimuksen lähtötietoina käytettiin esimerkkikohteessa aiemmin tehtyjä tutkimuksia. Lähtötietoja käsiteltiin pääasiassa Rail Doctor -ohjelmistolla. Ohjelmistossa voidaan tarkastella rinnakkain useita lähtötietoaineistoja kuvan 7.2 mukaisesti.





**Kuva 7.2** Näkymä tutkimusdatasta Rail Doctor -ohjelmassa.

Esimerkkikohteesta oli käytettävissä laserskannaustiedot, jotka kuvaavat radan ja ympäristön muotoja, kuten pengerkorkeutta ja ojan syvyyttä. Maatutkausdatasta tehtyjen tulokintojen perusteella saatiin arvio radan rakennekerrospaksuuksista. Esimerkkikohteelta oli saatavissa kosteusindeksi, joka kuvaa mittaushetken (kesä 2010) aikaista kosteustilaa tutkimusvälin mediaanikosteuteen nähden. Ratatietokannasta on saatavilla tiedot esimerkiksi routalevyjen, siltojen, vaihteiden, tunneleiden ja leikkauksien sijainneista. Kuvassa 7.2 sinisellä ja punaisella käyrällä kuvataan jatkuvatoimisella mittalaitteella mitattuja kokonaisjoustoja radalla. Mittaus on tehty molempiin suuntiin, joista saadaan keskimääräinen, musta käyrä. Käyrien yhdistämisellä voidaan eliminoida kaarvevaikutus mittauksesta. Tutkimusnäkyvässä on esitetty myös radan kallistus käyränä. Väridiagrammina on kuvattu radantarkastusvaunulla mitatut virheet korkeuspoikkeamassa (KPV). Edellä mainittujen datojen lisäksi käytettävissä oli radalta otetut valokuvat 50 metrin välein sekä kartta, jossa kuvataan tarkasteltavan pisteen sijaintia maastossa. Lisäksi käytettävissä oli tietoa pohjamaasta GTK:n maaperäkartalta sekä sepelin ikää ja puhdistusajankohtaa koskevat tiedot.

Seuraavissa luvuissa on esitetty erilaisia vertailuja eri lähtötietojen välillä. Tavoitteena oli löytää vaikutussuhteita eri suureiden välille. Vertailu aloitettiin kappaleen 7.3 mukaisesti korkeuspoikkeaman ja jäykkyyden vertaamisella muihin lähtötietoihin, sillä korkeuspoikkeaman ja jäykkyyden oletettiin kuvaavan parhaiten kuormituskestävyyttä. Seuraavassa kappaleessa 7.4 muodostettiin korkeuspoikkeamasta uusi suure, korkeuspoikkeaman muutosnopeus. Myös korkeuspoikkeaman muutosnopeutta verrattiin muihin lähtötietoihin, kuten aiemmassakin luvussa. Kappaleessa 7.5 testattiin radan luokittelusta eri lähtötietojen perusteella.

## 7.3 Eri lähtötietojen väliset yhteydet

Lähtötietojen tarkastelu aloitettiin etsimällä vaikutussuhteita radan eri ominaisuuksien välillä. Kuormituskestävyyttä parhaiten kuvaaviksi lähtötiedoiksi otaksuttiin korkeuspoikkeama KPV ja taipuma, joihin muita lähtötietoja verrattiin.

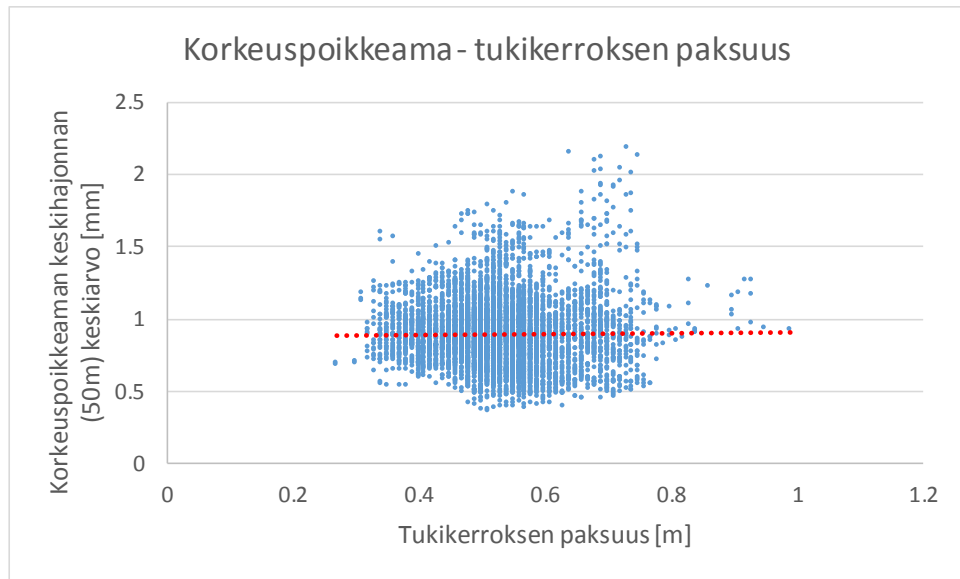
### 7.3.1 Korkeuspoikkeama – rakennekerrosten paksuudet

Tutkimuksessa käsiteltiin korkeuspoikkeaman KPV arvoja, jotka on mitattu radantarkastusvaunulla vasemmasta kiskosta. Radantarkastusvaunu mittaa korkeuspoikkeamaa 12 metrin mittakannalla, mutta tulokset muutetaan laskennallisesti 5 metrin mittakantaan. Mittakantamittauksen heikkoutena on tietyillä aallonpituuksilla esiintyvien virheiden korostuminen tai niiden jääminen huomaamatta. Ongelma korostuu symmetrisellä telivälillä tehdyissä mittauksissa, jolloin esimerkiksi siniaallon muotoisena esiintyvä korkeuspoikkeama näkyy mittauksessa kaksinkertaisena, kun siniaallon aallonpituus on yhtä suuri kuin mittakanta. Jos taas siniaallon aallonpituus on puolet mittakannasta, ei korkeuspoikkeamaa havaita lainkaan. Mittakantamittaukseen liittyviä ongelmia voidaan osittain ehkäistä käyttämällä epäsymmetrisiä telivälejä mittauskalustossa. Suomessa käytettävässä EMMA-radantarkastusvaunussa telivälit ovat 7+5 metriä. (Luomala et al. 2015, s. 21; Ratahallintokeskus 2005). Mittakantamuunnoksen lisäksi korkeuspoikkeamalle KPV on laskettu 50 metrin keskihajonta. Keskihajonta on laskettu jokaiselle mittauspisteelle 25 metriä ennen ja jälkeen olevista mittauksista.

Tarkasteltavat KPV-mittaukset on tehty vuosina 2007–2015. Vuosittain on tehty noin neljä mittausta eri vuodenaikoina. Mittaukset on jaettu talvi-, kevät-, kesä- ja syksymittauksiin. Huhtikuun 2011 mittaukselta on jätetty tarkastelussa huomiotta mittaustuloksissa esiintyvien poikkeavuuksien vuoksi. Vuosina 2007–2015 mitatuista arvoista laskettiin jokaiselle poikkileikkaukselle keskiarvo, joka kuvaa poikkileikkauksessa esiintyvän korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvoa. Keskiarvoa laskettaessa on huomioitu kaikkina vuodenaikoina tehdyt mittaukset. Tarkasteltavia poikkileikkauksia on viiden metrin välein välillä km 87+228–km 119.

Korkeuspoikkeamatietoa verrattiin ensimmäisenä radan rakennekerrosten paksuuteen. Rakennekerrosten paksuus on määritetty maatutka-aineiston tulkinnasta. Koska rakennekerrosten paksuuden määrittäminen tehdään tulkitsemalla maatutka-aineistoa, sisältyy menetelmään useita virhelähteitä esimerkiksi oletettuun materiaalien dielektrisyys ja rakenteen vesipitoisuuteen liittyen. Tulkittu kerrospaksuus on aina osittain tulkitsijan näkemukseen ja kokemukseen perustuva arvio. Kerrospaksuudet on määritetty tukikerrokselle, alusrakennekerrokselle ja mahdolliselle pengertäytteelle.

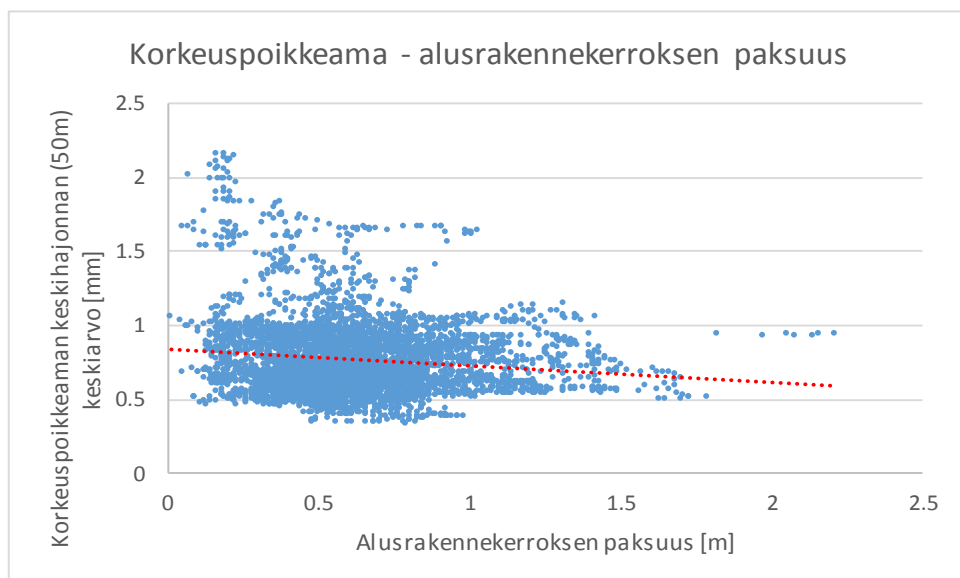
Kuvassa 7.3 on esitetty pystyakselilla korkeuspoikkeaman 50 metrin keskihajonnan keskiarvo vuosilta 2007–2015. Keskiarvo sisältää kaikkien vuodenaikojen mittaukset. Vaaka-akselilla on tukikerroksen paksuus. Punaisella pisteviivalla on esitetty trendiviiva.



**Kuva 7.3** Tukikerroksen paksuus ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo.

Havaintopisteiden joukon muodosta voidaan todeta hajonnan olevan suurta pisteiden välillä. Trendiviivan suunnasta voidaan taas päätellä, että tukikerroksen paksuudella ei ole vaikutusta korkeuspoikkeaman suuruuteen. Vaikka tukikerroksen paksuudella ei näyttäisi olevan merkitystä korkeuspoikkeaman kannalta, voivat muut tukikerroksen ominaisuudet vaikuttaa siihen merkittävästikin. Tällaisia ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi tukikerroksen rakeisuus ja sepelin materiaaliominaisuudet.

Kuvassa 7.4 on esitetty vastaava vertailu korkeuspoikkeaman ja alusrakennekerroksen paksuuden välillä. Trendiviiva on esitetty punaisella pisteviivalla.

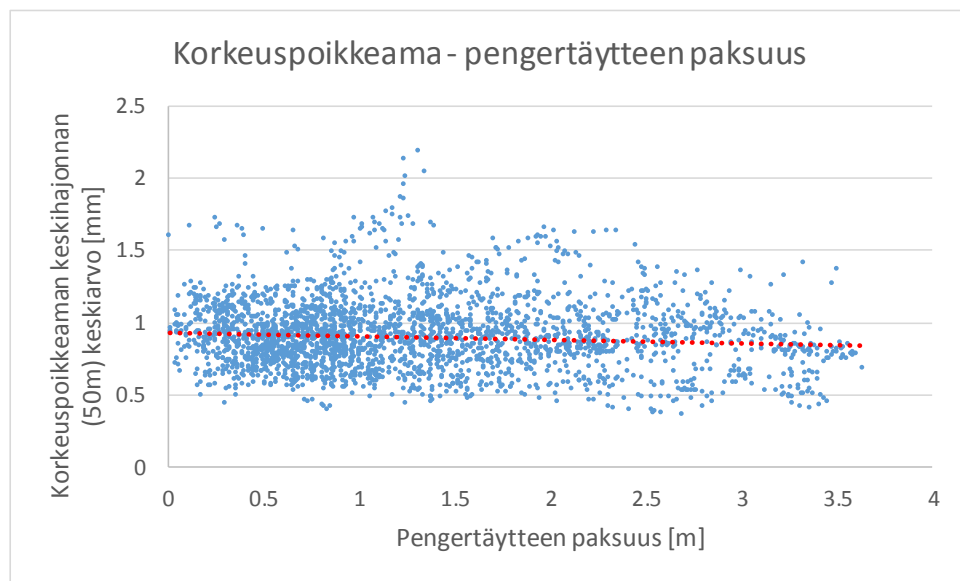


**Kuva 7.4** Alusrakennekerroksen paksuus ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo.

Alusrakennekerroksen paksuudella ja korkeuspoikkeamalla voidaan trendiviivan perusteella havaita yhteys. Paksummalla alusrakennekerroksella korkeuspoikkeaman hajonta

on keskimäärin pienempi kuin ohuella alusrakenteella. Alusrakenteen paksuuden ja korkeuspoikkeaman välinen yhteys ei kuitenkaan välttämättä ole suora, vaan se voi olla myös välillinen. Paksumpi alusrakenne periaatteessa tarkoittaa korkeampaa ratapengertä, mikä taas vaikuttaa ratarakenteen kuivatukseen ja routimiseen. Pienempi korkeuspoikkeama voi siis tosiasiallisesti johtua paremmasta kuivatuksesta ja pienemmästä routimisesta, joita alusrakennekerroksen paksuus edesauttaa.

Kuvassa 7.5 on esitetty korkeuspoikkeaman ja pengertäytteen paksuuden välinen suhde. Pengertäytettä ei esiinny kaikissa havaintopisteissä, joten havaintojen määrä pengertäytteen paksuuden osalta on pienempi kuin tuki- ja alusrakennekerrosten osalta.



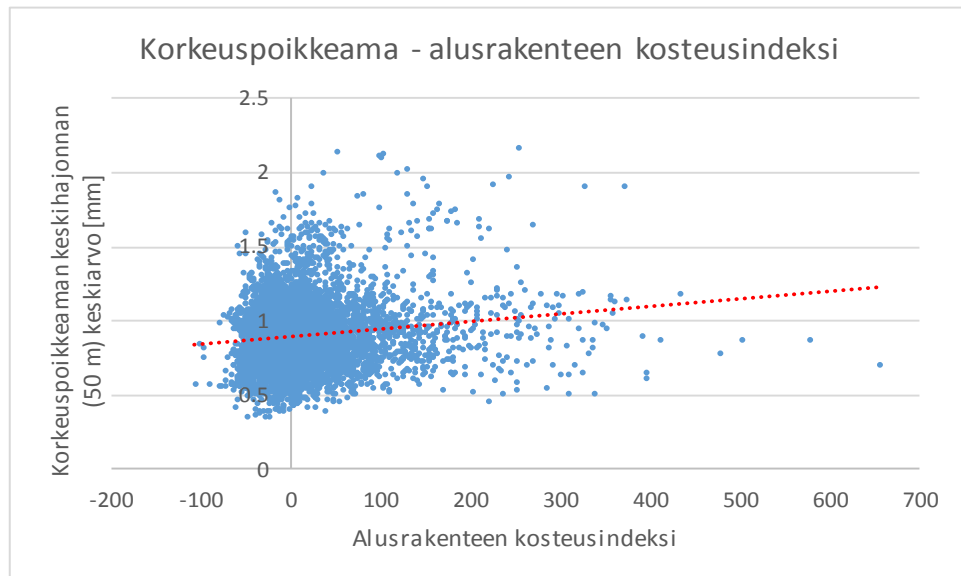
**Kuva 7.5** Mahdollisen pengertäytteen paksuus ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo.

Kuvassa 7.5 pengertäytteen suhde korkeuspoikkeaman suuruuteen ei ole selkeä, vaan kuvaajassa on nähtävissä hajontaa. Kuvaajaan piirretty trendiviiva kuitenkin osoittaa, että pengertäytteen paksuudella olisi samansuuntainen vaikutus korkeuspoikkeaman suuruuteen kuin alusrakenteen paksuudellakin: pengertäytteen paksuuden kasvaessa korkeuspoikkeaman suuruus pienenee. Yhteys näiden suureiden välillä on kuitenkin hyvin vähäinen.

### 7.3.2 Korkeuspoikkeama – kosteustila ja ojasyvyys

Ratarakenteessa vallitseva kosteustila vaikuttaa rakennemateriaalien toimintaan. Tässä tutkimuksessa käytettävissä oli kosteusindeksi, joka kuvaa mittapisteen kosteutta suhteessa koko tutkimusalueen mediaaniin. Indeksia määritettäessä mediaanitilanteen arvoksi on määritetty nolla. Nollaa suuremmat arvot kertovat keskimääräistä korkeammasta kosteuspitoisuudesta ja negatiiviset arvot keskimääräistä kuivemmasta rakennekerroksesta.

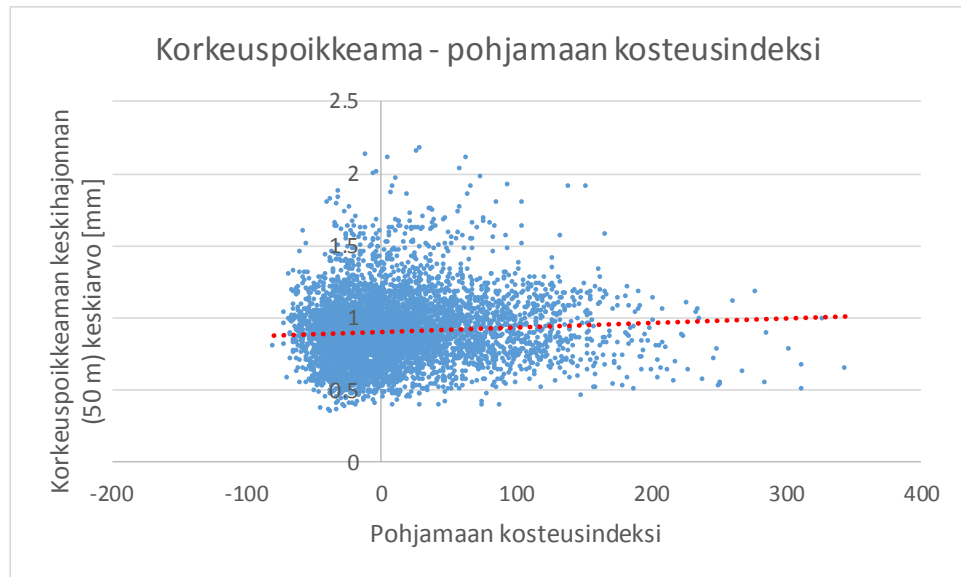
Kuvassa 7.6 on esitetty vaaka-akselilla radan alusrakennekerroksen kosteusindeksi ja pystyakselilla korkeuspoikkeaman (KPV) keskihajonnan keskiarvo, kuten aiemminkin. Trendiviiva on esitetty kuvassa punaisella pisteviivalla.



**Kuva 7.6** Alusrakennekerroksen kosteusindeksi ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo.

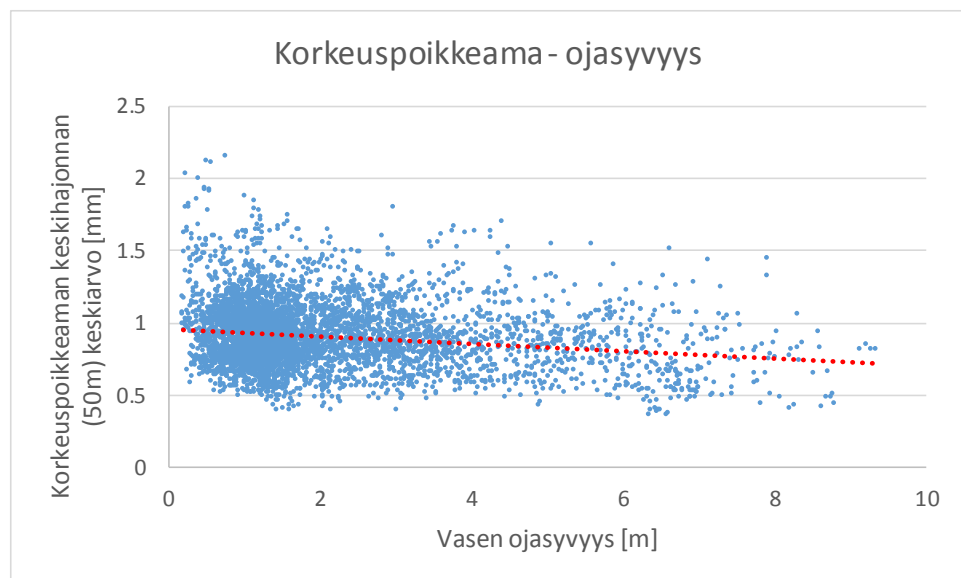
Kuvaajasta havaitaan, että alusrakenteen kosteusindeksillä on yhteys korkeuspoikkeamaan. Alusrakenteen kosteusindeksin kasvaessa korkeuspoikkeama kasvaa. Korkea alusrakenteen kosteusindeksi voi edesauttaa esimerkiksi routimista, mikä havaitaan radalla korkeuspoikkeamana.

Kuvassa 7.7 on esitettynä vastaava kuvaaja pohjamaan kosteusindeksille ja korkeuspoikkeamalle. Pohjamaan kosteusindeksillä ja korkeuspoikkeamalla ei ole yhtä vahvaa yhteyttä kuin alusrakenteen kosteusindeksillä ja korkeuspoikkeamalla, mutta niiden välillä voidaan silti havaita samansuuntainen yhteys. Pohjamaan kosteusindeksin kasvaessa korkeuspoikkeama kasvaa. Syyt tähän voivat olla samankaltaisia kuin alusrakennekerroksen kosteusindeksillä.



**Kuva 7.7** Pohjamaan kosteusindeksi ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo.

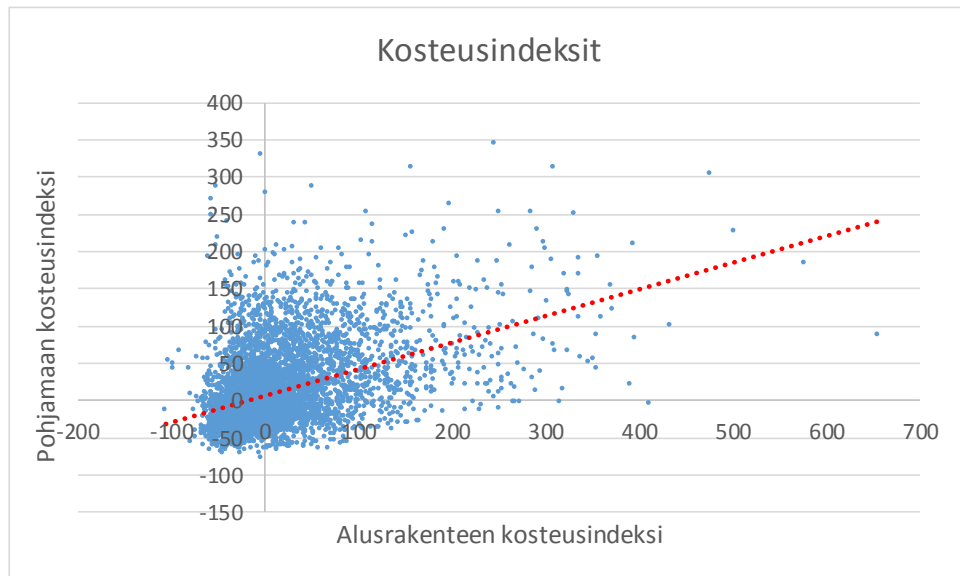
Korkeuspoikkeaman suhdetta ojasyvyyteen on kuvattu kuvassa 7.8. Vertailussa on käytetty radan vasemmanpuoleista ojasyvyyttä. Punaisella pisteviivalla on kuvattu trendiviivaa.



**Kuva 7.8** Korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo ja vasen ojasyvyys.

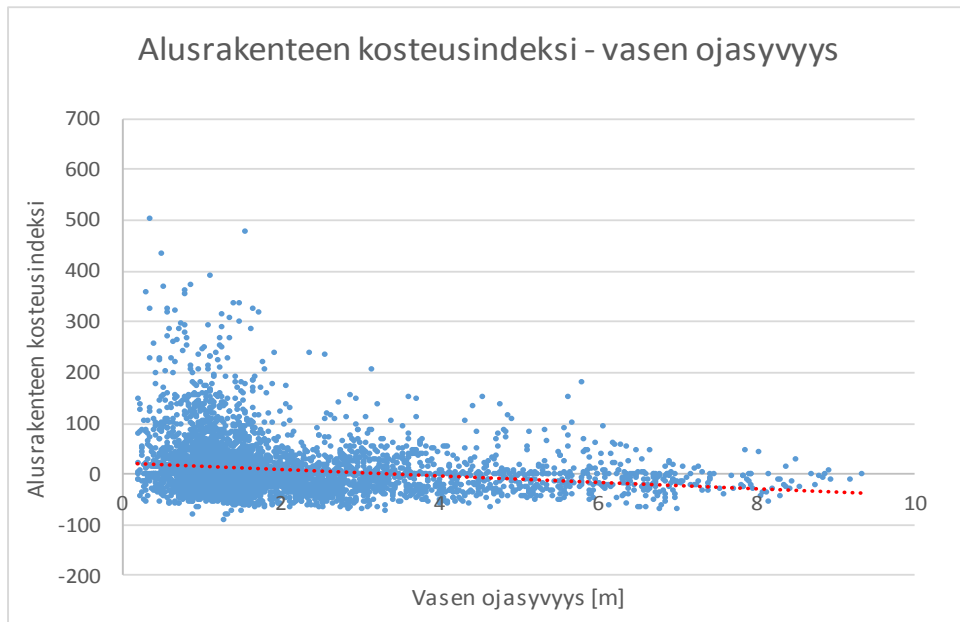
Kuvasta voidaan nähdä, että ojasyvyyden kasvaessa korkeuspoikkeama pienenee. Tämä on todennäköisesti yhteydessä kosteusindeksien ja korkeuspoikkeaman väliseen yhteyteen, jotka esitettiin aiemmissa kuvissa 7.6 ja 7.7. Suurempi ojasyvyys johtaa parempaan kuivatukseen ja kosteustilan alenemiseen ratarakenteessa. Suuri ojasyvyys indikoi myös korkeaa pengertä.

Kuvassa 7.9 on verrattu alusrakenteen ja pohjamaan kosteusindeksejä. Alusrakenteen ja pohjamaan kosteustilan välillä on selvä yhteys. Alusrakenteen kosteusindeksin ollessa korkea myös pohjamaan kosteusindeksi on korkea ja päinvastoin.



**Kuva 7.9** Pohjamaan kosteusindeksi ja alusrakennekerroksen kosteusindeksi.

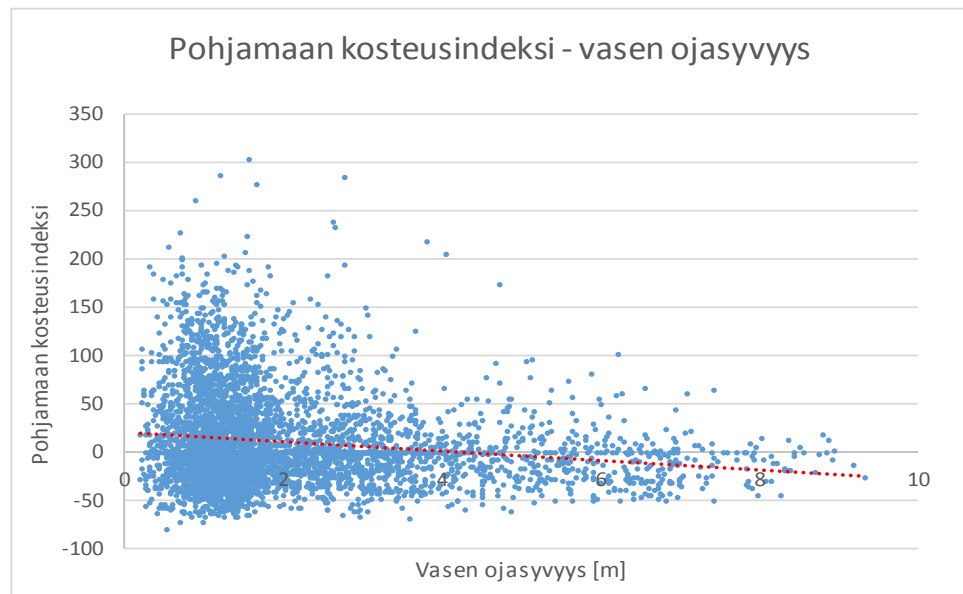
Kuvissa 7.10 ja 7.11 on esitetty kosteusindeksin ja ojasyvyyden yhteys. Kuvaajia tarkasteltaessa on hyvä huomioida, että lähtötietojen kohdistaminen täsmälleen oikeisiin pisteisiin ei ollut ojasyvyyden ja kosteusindeksin kohdalla mahdollista, vaan ne ovat puolen metrin etäisyydellä toisistaan.



**Kuva 7.10** Alusrakenteen kosteusindeksi ja ojasyvyys.

Kuvassa 7.10 on nähtävissä, että ojasyvyyden kasvaessa alusrakenteen kosteusindeksi on keskimäärin pienempi kuin matalilla ojasyvyyksillä. Kun ojan syvyys ylittää noin 3,5

metriä, kosteusindeksi on keskimäärin negatiivinen eli kuivatus on parempi kuin rataosalla keskimäärin.



**Kuva 7.11** Pohjamaan kosteusindeksi ja ojasyvyys.

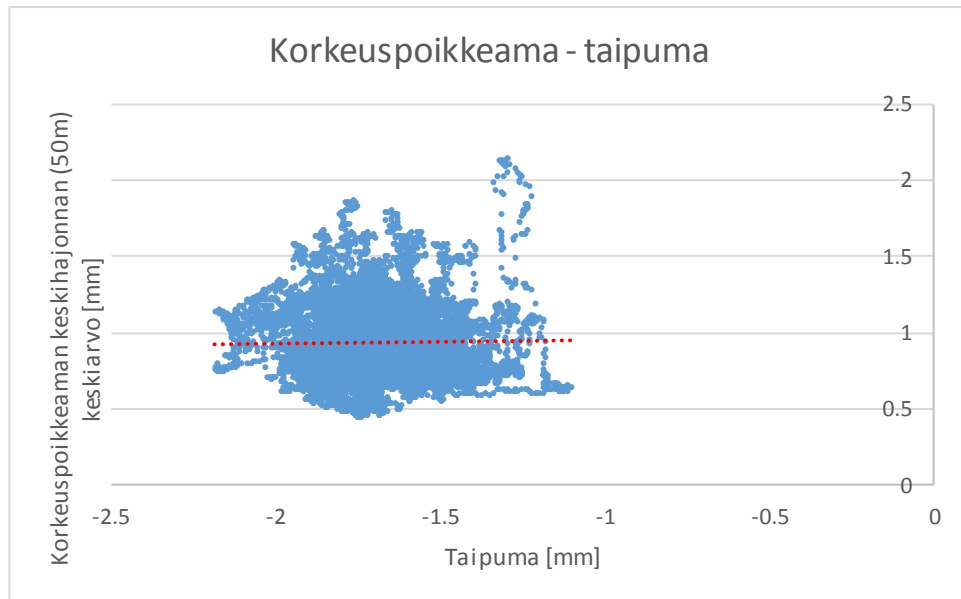
Myös pohjamaan kosteusindeksin ja ojasyvyyden välillä voidaan kuvasta 7.11 havaita yhteys. Pohjamaan kosteusindeksi keskimäärin pienenee, kun ojasyvyys kasvaa. Kun ojasyvyys ylittää noin 3,9 metriä, on pohjamaan kosteustila keskimääräistä kuivempi.

Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että suuri ojasyvyys parantaa ratarakenteen ja pohjamaan kuivatusta, mikä johtaa pienempään korkeuspoikkeamaan.

### 7.3.3 Korkeuspoikkeama – taipuma

Korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvoa verrattiin mitattuun radan taipumaan. Taipuma kuvaa ratarakenteessa tapahtuvaa palautuvaa muodonmuutosta liikennekuormituksen alla. Tässä tutkimuksessa käytetty taipumadata on mitattu jatkuvatoimisella mittauslaitteella. Mittausajot on tehty molemmista suunnista ja näiden kahden ajon tuloksista on laskettu taipuman keskiarvo. Taipuman ja korkeuspoikkeaman suhdetta on esitetty kuvassa 7.12.



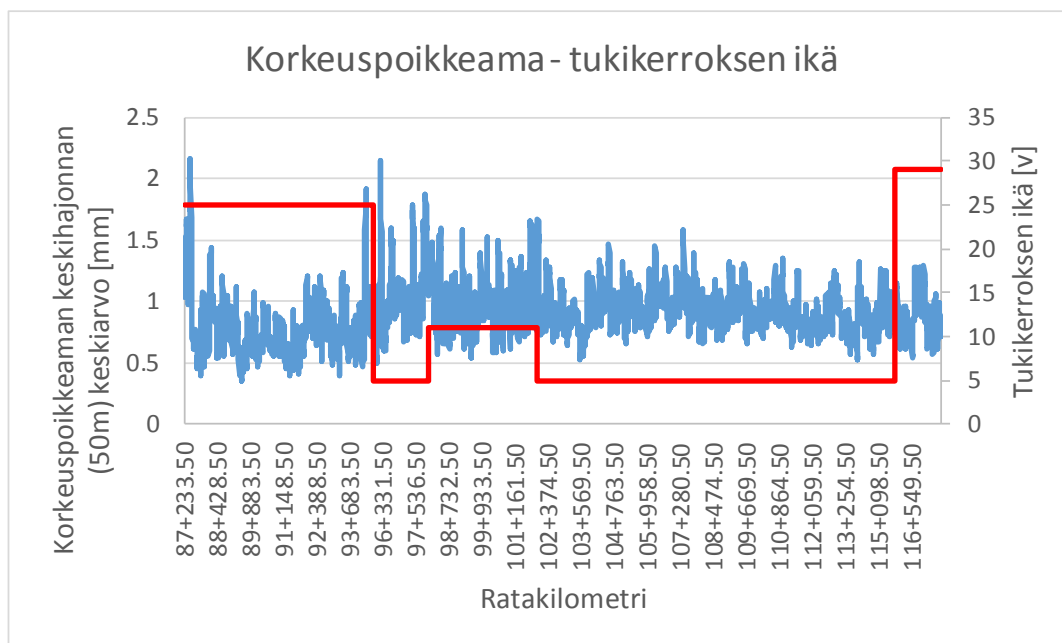


**Kuva 7.12** Taipuma ja korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo

Taipuman ja korkeuspoikkeaman välillä ei havaita yhteyttä tarkastellun aineiston perusteella. Suuri taipuma ei siis indikoi suurta korkeuspoikkeamaa, vaan suuret vaikuttavat olevan riippumattomia toisistaan. Taipumaan ja korkeuspoikkeamaan voidaan siis olettaa vaikuttavan eri asiat.

### 7.3.4 Korkeuspoikkeama – tukikerroksen ikä

Sepelin ikä vaikuttaa tukikerroksen ominaisuuksiin. Tukikerroksessa tapahtuva hienoneminen ja tiivistyminen aiheuttavat muutoksia radan geometriassa. Kuvassa 7.13 on verrattu korkeuspoikkeaman keskihajonnan keskiarvoa ja sepelin ikää.

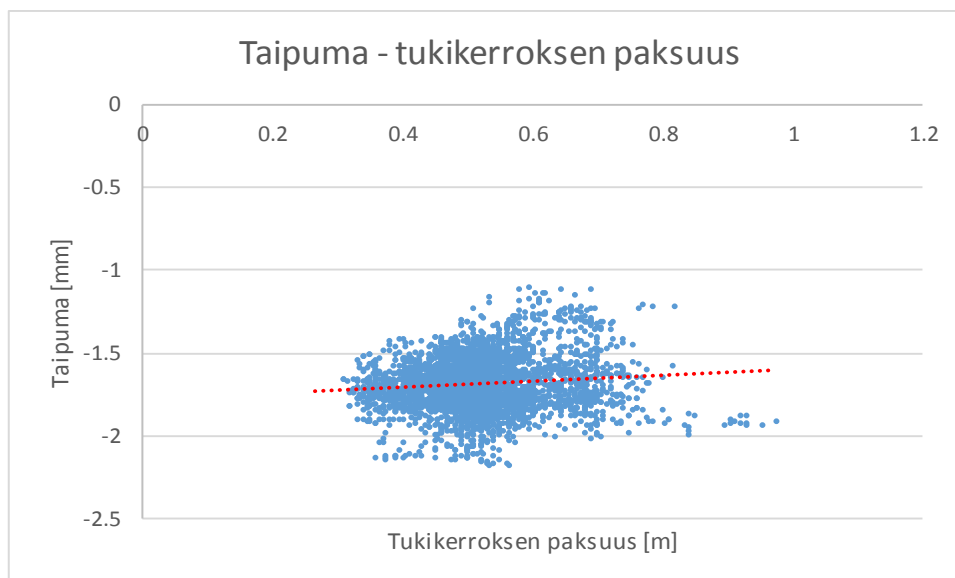


**Kuva 7.13** Korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvo ja tukikerroksen ikä.

Kuvasta 7.13 havaitaan, että tukikerroksen iän ollessa 25 vuotta on korkeuspoikkeama keskimääräistä pienempää. Ratakilometreillä 96–98, joilla tukikerroksen ikä on 5 vuotta, korkeuspoikkeama on keskimäärin melko suurta. Toisaalta ratakilometreillä 102–116 tukikerroksen ikä on myös 5 vuotta, mutta korkeuspoikkeaman vaihteluväli on selvästi pienempi kuin välillä 96–98. Esimerkkikohteen perusteella ei voida havaita yhteyttä korkeuspoikkeaman ja sepelin iän välillä.

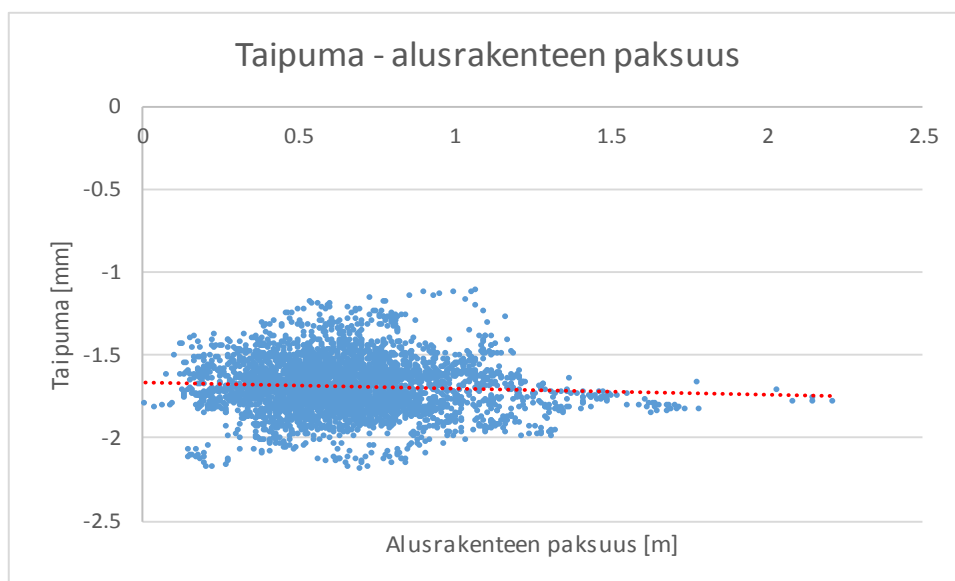
### 7.3.5 Taipuma – kerrospaksuus

Kuvissa 7.14 ja 7.15 on verrattu radassa tapahtuvaa taipumaa sekä tukikerroksen että alusrakennekerroksen paksuuteen. Punaisella pisteviivalla on merkitty trendiviiva. Taipuma on mitattu jatkuvatoimisella mittalaitteella ja kerrospaksuudet on määritetty maatutkakuvasta.



**Kuva 7.14** Tukikerroksen paksuus ja taipuma.

Kuvaajaan 7.14 piirretystä trendiviivasta havaitaan, että tukikerroksen paksuuden kasvaessa taipuma pienenee. Yhteys ei kuitenkaan ole selkeä, sillä tulosten hajonta on suurta. Paksu tukikerros vaikuttaisi jäykistävän rakennetta.

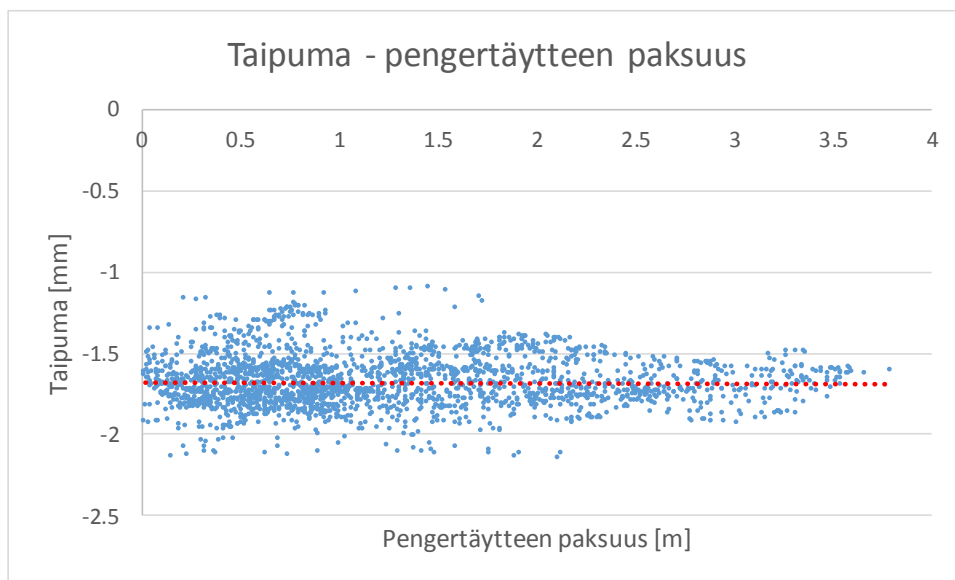


**Kuva 7.15** Alusrakennekerroksen paksuus ja taipuma.

Kuvasta 7.15 taas huomataan, että alusrakennekerroksen paksuuden kasvaessa radan taipuma keskimäärin kasvaa. Vaikutus on siis päinvastainen kuin tukikerroksen paksuudella. Erisuuntaiset vaikutukset voivat selittyä rakennekerrosten erilaisilla materiaaliominaisuuksilla. Tukikerroksen materiaali on hyvin karkearakeista, kun taas alusrakenteessa käytetyt materiaalit ovat huomattavasti hienorakeisempia. Karkearakeisen materiaalin

kantavuus on selvästi suurempi kuin hienorakeisemmalla materiaalilla. Tästä syystä karkearakeinen tukikerros jäykistää rakennetta ja hienorakeinen alusrakenne lisää rakenteen joustavuutta eli taipumaa.

Kuvassa 7.16 on esitetty pengertäytteen paksuuden suhdetta taipuman suuruuteen. Kuvasta havaitaan, että pengertäytteellä ei ole merkitystä taipuman suuruuteen.

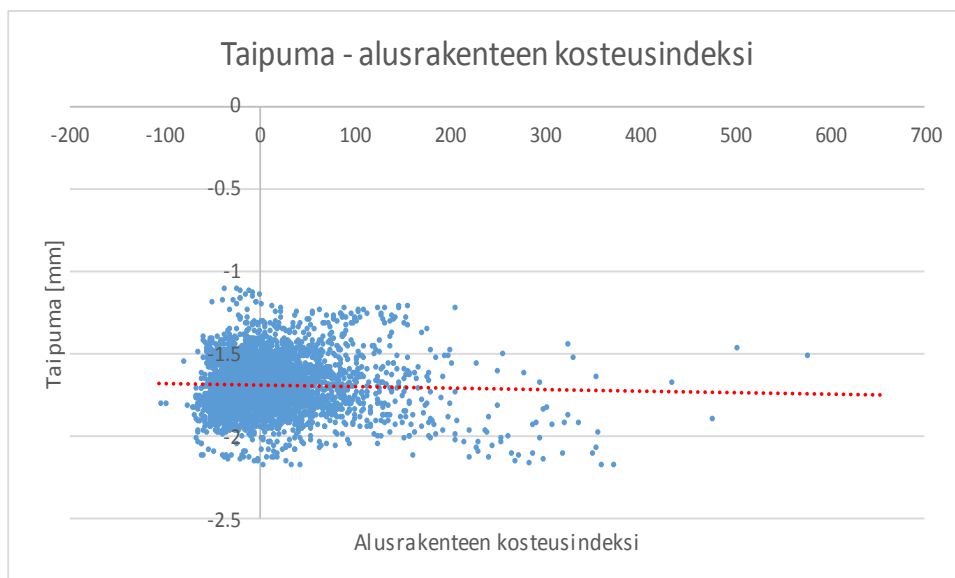


**Kuva 7.16** Pengertäytteen paksuus ja taipuma.

Pengertäytteen vaikutusta ratarakenteen jäykkyyteen on vaikea arvioida, sillä taipumamittauksessa käytetyt akselipainot ovat pieniä, jolloin niiden aiheuttama taipumasuppilo ei välttämättä yllä kovin syvälle ratarakenteeseen. Alusrakenteen ollessa paksu ei pengertäytteellä välttämättä ole vaikutusta taipumaan.

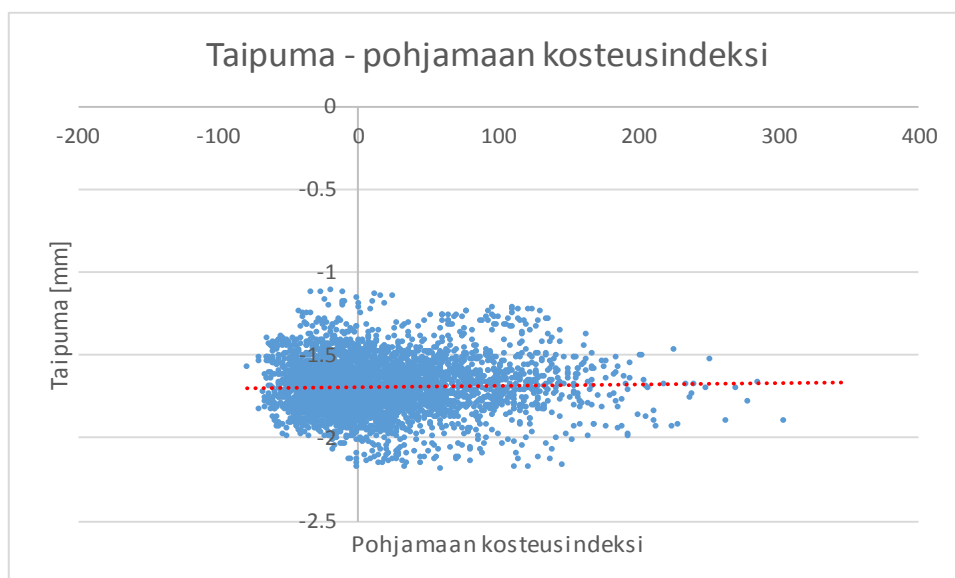
### 7.3.6 Taipuma – kosteustila ja ojasyvyys

Jäykkyysdataa verrattiin myös radassa vallitsevaan kosteustilaan. Kosteustilaa on kuvattu kosteusindeksillä, jonka määrittämisestä on kerrottu tarkemmin kappaleessa 7.2. Jäykkyysdataa on verrattu sekä alusrakenteen kosteusindeksiin että pohjamaan kosteusindeksiin kuvissa 7.17 ja 7.18.



**Kuva 7.17** Alusrakenteen kosteusindeksi ja taipuma.

Alusrakenteen kosteusindeksin ja taipuman välillä voidaan havaita heikko yhteys. Kosteusindeksin kasvaminen lisää hieman radalla tapahtuvaa taipumaa. Vaikutus on kuitenkin heikko ja havaintopistejoukossa on hajontaa.

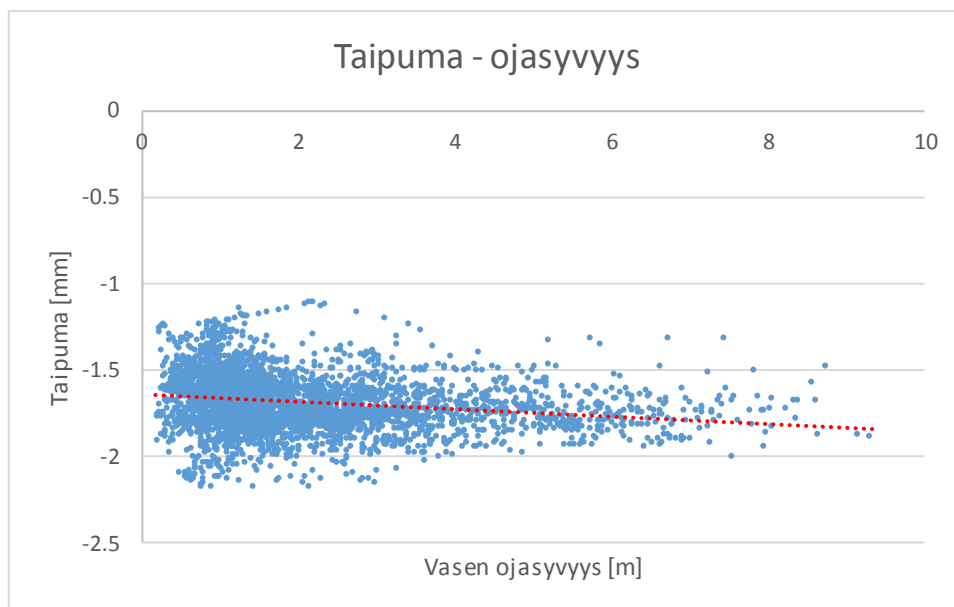


**Kuva 7.18** Pohjamaan kosteusindeksi ja taipuma.

Pohjamaan kosteusindeksillä ei kuvan 7.18 perusteella ole vaikutusta radalta mitattuun taipumaan. Pohjamaan ominaisuuksien vaikutusta taipumaan on kuitenkin vaikea arvioida, sillä taipumamittauksessa käytetyn akselipainon aiheuttama taipumasuppilo ei välttämättä yllä pohjamaan asti. Taipumamittaukset tulisivat tehdä käyttäen suurempaa akselipainoa, jotta pohjamaan vaikutusta voitaisiin varmuudella arvioida.

Tuloksia tulkittaessa tulee huomioida myös se, että taipuma- ja kosteustilamittaukset on tehty eri aikoihin, jolloin kosteusindeksi ei kuvaa taipumamittausten aikaista kosteustilaa. Mittaukset tulisivat suorittaa samanaikaisesti, jotta tiedot olisivat vertailukelpoisia.

Taipuman arvoja verrattiin myös ojasyvyyteen (kuva 7.19). Ojasyvyys on määritetty laserkeilauksesta. Kuvassa on käytetty radan vasemman puolen ojalalle määritettyjä arvoja.



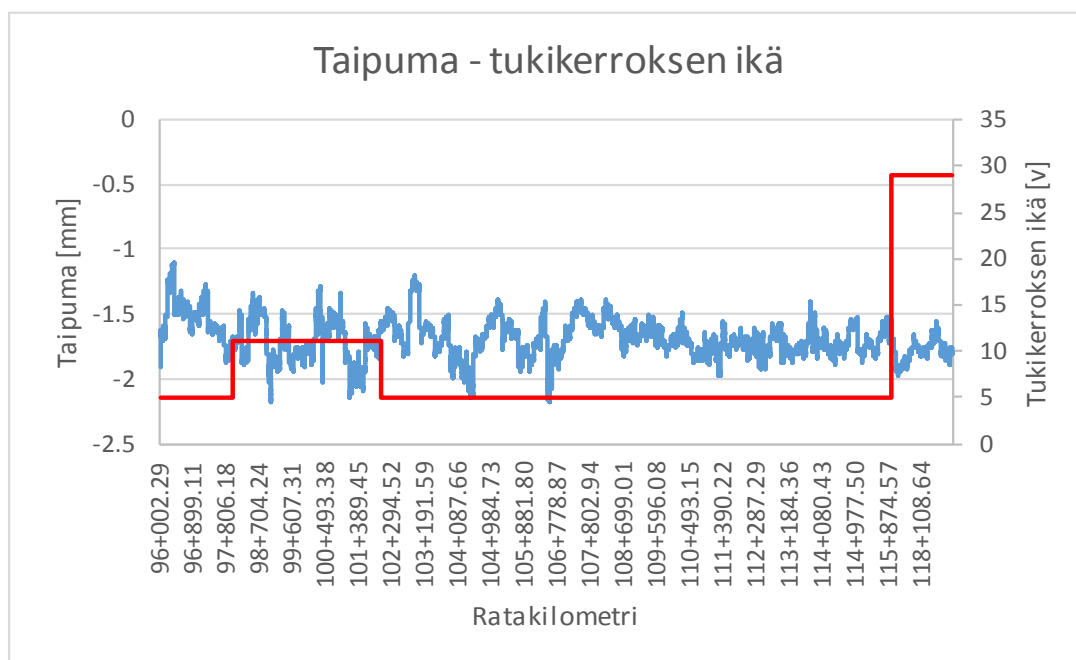
**Kuva 7.19** Ojasyvyys ja taipuma.

Kuvasta havaitaan, että ojasyvyyden kasvaessa myös taipuman suuruus kasvaa. Ojasyvyyden voidaan ajatella kuvaavan myös pengerkorkeutta, jolloin pengerkorkeuden kasvaessa taipuman suuruus kasvaa. Korkealla penkereellä korostuvat alusrakenteen ja pengertäytteen ominaisuudet. Aiemmin todettiin ainakin alusrakennekerroksen paksuuden kasvattavan radalla havaittavaa taipumaa. Pengertäytteellä ei näyttänyt olevan vaikutusta taipuman suuruuteen. Mutta kuten aiemmin todettiin, ei kevyellä akselipainolla suoritettu taipumamittaus välttämättä riitä ulottamaan taipumasuppiloa pengertäytteen syvyydelle. Kuvassa 7.19 havaittu taipuman ja ojasyvyyden suhde selittyy täten todennäköisesti alusrakennekerroksen ominaisuuksilla. Korkea penger mahdollistaa suuremmat palautuvat muodonmuutokset.

### 7.3.7 Taipuma – tukikerroksen ikä

Sepelin vanhentuessa sen ominaisuudet muuttuvat kulumisen myötä. Tämä vaikuttaa tukikerroksen toimintaan ja ominaisuuksiin. Kuvassa 7.20 on verrattu sepelin ikää taipuman suuruuteen. Sinisellä käyrällä on piirretty taipuman suuruus ja punaisella käyrällä sepelin ikä ratakilometrien suhteen. Tarkasteltavalla rataosalla vanhin sepeli on vuodelta 1987, jolloin sen ikä on 29 vuotta. Tätä uudemmat sepelit on seulottu vuosina 2005 tai 2011.

Seulonnan yhteydessä tukikerroksesta on poistettu hienontunut kiviaines ja poistetun sepelin tilalle on lisätty uutta sepeliä. Sepelin ikä on ilmoitettu lähtöaineistossa kilometrin tarkkuudella, joten tätä tarkempia rajoja tehdyille seuloille ei voida esittää.

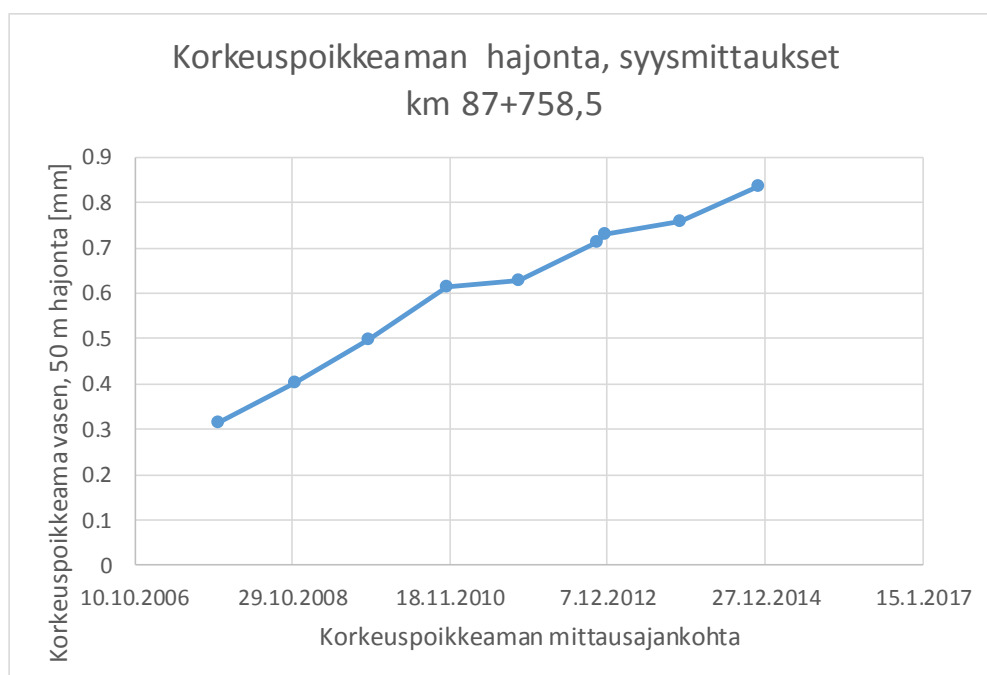


**Kuva 7.20** Taipuma ja tukikerroksen ikä.

Taipuman ja tukikerroksen iän välillä ei voida havaita yhteyttä. Taipuman suuruuteen vaikuttavat voimakkaammin muut tekijät, kuten radassa esiintyvät epäjatkuvuuskohdat ja alusrakenteen jäykkyys.

## 7.4 Korkeuspoikkeaman hajonnan muutosnopeus

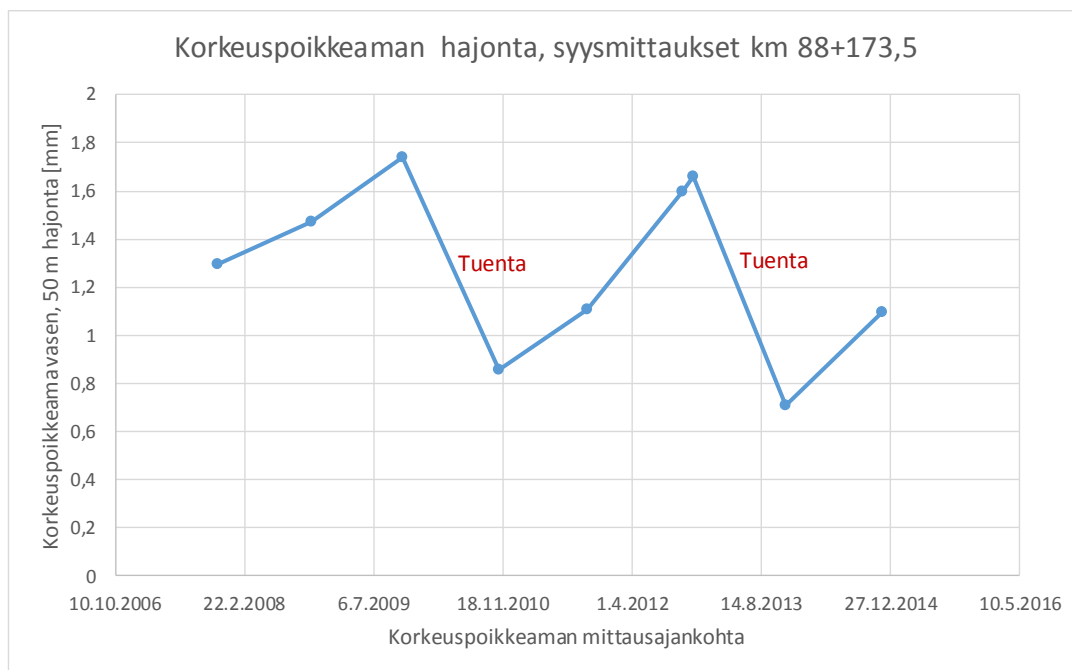
Radan geometrian huononemista voidaan tarkkailla erilaisilla mittauksilla. Mittaamalla esimerkiksi korkeuspoikkeamaa säännöllisesti voidaan havaita radan pystygeometrian heikkenevän ajan suhteen. Kuvassa 7.21 on esitetty ratakilometrillä km 87+758,5 tehdyt korkeuspoikkeaman (KPV) mittaukset vuosilta 2007–2014. Tarkastellut arvot ovat 50 metrin keskihajonnan arvoja. Tarkasteluun on otettu mukaan vain syysmittaukset, sillä talvella tuloksiin vaikuttavat routaantumisen ja kevään tuloksiin vastaavasti roudan sulaminen. Routavaurioita korjataan kesän aikana, joten tehdyt toimenpiteet havaitaan parhaiten syysmittauksissa. Korkeuspoikkeama kasvaa lähes lineaarisesti, kuten kuvasta 7.21 voidaan havaita.



**Kuva 7.21** Korkeuspoikkeaman keskihajonnan muutokset syysmittausten mukaan ratakilometrillä km 87+758,5.

Korkeuspoikkeama kasvaa, kunnes syntynyt korkeuspoikkeama korjataan radan tuke-  
misella. Tuennalla korjataan radan korkeusasemaa, jolloin korkeuspoikkeama pienenee.  
Kuvassa 7.22 on esitetty kuvaa 7.21 vastaava korkeuspoikkeaman hajontakäyrä rataki-  
lometriltä km 88+173,5. Kuvaajasta havaitaan korkeuspoikkeama kasvavan ensimmäisen  
kolmen mittauksen aikana, kunnes korkeuspoikkeaman taso putoaa selvästi ja aloittaa  
jälleen kasvamisen. Tästä kuvaajan muodosta voidaan päätellä tutkimuspisteessä suori-  
tettujen tuentojen ajankohta ja määrä, sillä tuennat parantavat raiteen pystygeometriaa.  
Pisteessä km 88+173,5 tuentoja on tehty tutkittavalla aikavälillä kahdesti kuvan osoitta-  
milla aikaväleillä.



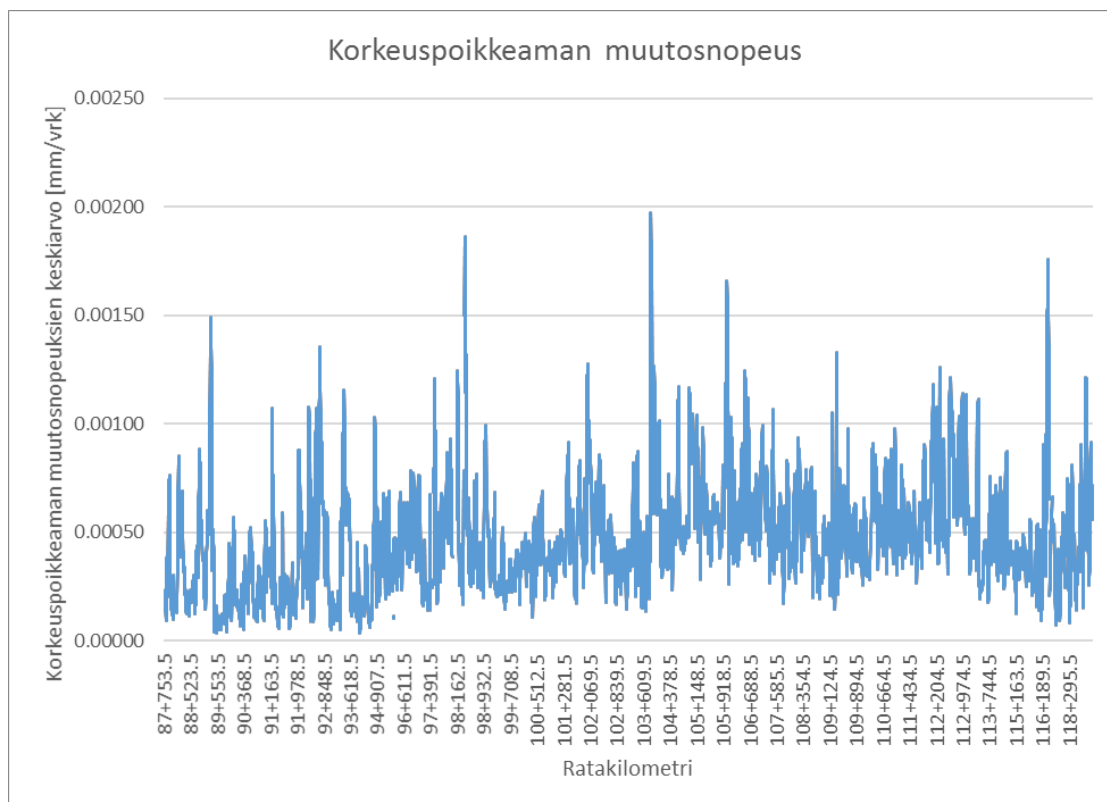


**Kuva 7.22** Korkeuspoikkeaman keskihajonnan muutokset syysmittausten mukaan ratakilometrillä km 88+173,5.

Kuvia 7.21 ja 7.22 verrattaessa voidaan havaita, että korkeuspoikkeaman hajonta kasvaa kuvassa 7.21 lähes lineaarisesti. Kuvassa 7.22 taas voidaan havaita kuvaajan muodon perusteella, että korkeuspoikkeaman kasvu on jopa kiihtyvää. Kasvu voi kiihtyä korkeuspoikkeaman kasvaessa riittävän suureksi tai korkeuspoikkeaman suuruus voi kiihtyä tuentojen seurauksena.

Kuormituskestävyyden kannalta olennaisinta on korkeuspoikkeaman muutosnopeus. Mitä nopeammin korkeuspoikkeama kasvaa, sitä heikompana radan kuormituskestävyyttä voidaan pitää. Vastaavasti hitaampi korkeuspoikkeaman kasvu kertoo hyvästä kuormituskestävyydestä. Liikennemäärä vaikuttaa korkeuspoikkeaman kasvunopeuteen, mutta tutkittavalla rataosuudella liikennemäärä on kaikissa kohdissa yhtä suuri. Jos radan korkeuspoikkeamavirhe kasvaisi samalla nopeudella ja pysyisi yhtä suurena koko rataosalla, voitaisiin rataosuus tukea ja parantaa samanaikaisesti koko matkaltaan. Toisin sanoen rataosuuden tulisi saavuttaa geometriavirheiden maksimiavot yhtäaikaaisesti. Mikäli korkeuspoikkeaman muutosnopeus tunnetaan, voidaan tukemistarve ennustaa lähtötietojen ja sallittujen maksimikorkeuspoikkeamien avulla. Kunnossapidon ennakoitavuus pienentäisi radan elinkaarikustannuksia.

Muutosnopeus voidaan määrittää kulmakertoimen avulla. Tässä tutkimuksessa kulmakertoimet on laskettu syysmittauksista tuentojen väliltä, mikäli tuentojen välillä on vähintään kolme mittausta. Mikäli pisteessä on tehty tutkimusaikana useampia tuentoja, voidaan pisteelle laskea useampia kulmakertoimia, jos edellä mainittu ehto täyttyy. Esimerkiksi kuva 7.22 mukaiselle pisteelle voidaan laskea kaksi kulmakertoiminta. Tutkittavalle rataosalle laskettujen kulmakertoimien keskiarvot on esitetty kuvassa 7.23.



**Kuva 7.23** Korkeuspoikkeaman muutosnopeudet tutkittavalle rataosalle syysmittauksista.

Kuvasta voidaan nähdä, että korkeuspoikkeaman muutosnopeuden taso on matalampi kilometrivälillä 87–93 kuin esimerkiksi välillä 104–108. Tästä voidaan päätellä, että kilometrivälillä 87–93 radan kuormituskestävyys on keskimäärin parempi kuin välillä 104–108. Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ei kuitenkaan kerro korkeuspoikkeaman suuruudesta, joka saattaa keskimäärin olla suurempi hitaan muutosnopeuden osuudella kuin nopean muutosnopeuden osuudella. Korkeuspoikkeaman suuruudella ei kuitenkaan ole merkitystä, mikäli korkeuspoikkeama ei ylitä raja-arvoa.

Radan kuormituskestävyys voidaan määrittellä ratarakenteen kyvyksi vastustaa pysyvien muodonmuutosten syntymistä, kuten tutkimuksen alussa kappaleessa 2.1.1 määriteltiin. Korkeuspoikkeaman muutosnopeus kuvaa radan pystysuuntaisen geometrian heikkenemisnopeutta eli osaltaan myös kuormituskestävyyttä.

#### 7.4.1 Korkeuspoikkeaman muutosnopeuksien vertailu

Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden perusteella rata voidaan jakaa osuuksiin, joilla korkeuspoikkeaman muutosnopeus on hidas tai nopea. Tässä tutkimuksessa huonoja kohteita valittiin edustamaan kohdat, joiden korkeuspoikkeaman kulmakertoimen keskiarvo on yli 0,001. Hyviä kohteita edustamaan valittiin kohdat, joissa korkeuspoikkeaman kulmakertoimen keskiarvo on alle 0,0001.

Tarkastelukriteerit täyttäviä pisteitä oli molemmissa tapauksissa noin 40–50, joten tarkasteltava joukko oli hyvin pieni osa koko tutkimusvälistä. Tarkastelukriteerit täyttävistä kohteista kerättiin muut saatavilla olevat lähtötiedot. Sekä hitaiden että nopeiden muutosnopeuksien kohteiden lähtötiedoista laskettiin keskiarvot. Tulokset on esitetty taulukossa 7.1.

**Taulukko 7.1** Hitaan ja nopean korkeuspoikkeaman muutosnopeuden kohteiden vertailu.

Keskiarvot	Yksiköt	Hidas muutosnopeus <0.0001	Nopea muutosnopeus >0.001
KPV min	mm	0.42	0.5
KPV max	mm	0.71	1.79
Tukikerroksen paksuus	m	0.55	0.53
Alusrakennekerroksen paksuus	m	0.68	0.51
Mahdollisen pengertäytteen paksuus	m	1.72	1.54
Kalliopinnan syvyys pinnasta	m	1.64	1.16
Ojasyvyys			
-vasen	m	-3.35	-1.64
-oikea	m	-2.41	-1.78
Kosteusindeksi			
-alusrakenne		-0.33	29.38
-pohjamaa		0.8	17.75
Taipuma	mm	-1.81	-1.73
Tukikerroksen ikä	v	25.5	9.29
Routaeristekohteiden osuus	%	0	14.58
Leikkausten osuus	%	20	64.58

Taulukosta huomataan, että korkeuspoikkeamavirheen KPV miniarvot eroavat vähän hitaiden ja nopeiden kohteiden välillä, mutta KPV maksimiarvot eroavat yli 1,0 mm. Tukikerroksen paksuudessa ei ole juuri eroa, mutta alusrakennekerroksen paksuus eroaa 0,17 metriä. Kalliopinta on hitaan muutosnopeuden kohteissa 0,48 m syvemmällä kuin nopean muutosnopeuden kohteissa. Nopean muutosnopeuden kohteissa ojien syvyys on huomattavasti pienempi kuin hitaan muutosnopeuden kohteissa. Myös kosteusindeksi on huomattavasti korkeampi nopean muutosnopeuden kohteissa. Hitaan muutosnopeuden alueilla raidesepeli on keskimäärin 25,5 vuotta vanhaa, kun taas nopean muutosnopeuden alueella sepeli on vain 9,29 vuotta vanhaa. Nopean muutosnopeuden kohteista noin 65 % sijaitsee leikkauksissa, mikä osaltaan selittää matalammat ojasyvyyydet. Matalat ojasyvyyydet taas voivat selittää korkeammat kosteusindeksit. Hitaan muutosnopeuden kohteista yksikään ei sisällä routaeristeitä ja leikkauksissakin sijaitsee vain 20 % kohteista. Nopean muutosnopeuden kohteista noin 15 % sisältää routaeristeen.

Taipuma on 0,08 mm suurempi hitaan muutosnopeuden poikkileikkauksissa. Havainto on yllättävä, sillä suurempi palautuva painuma ennakoi tyypillisesti suurempaa pysyvää painumaa. Suurempi taipuma voi toisaalta edesauttaa rataa kohdistuvien junakuormien tasaisempaa jakautumista ratapenkereessä, jolloin esimerkiksi maarakeiden hienontumista aiheuttavat voimat jäävät pienemmiksi. Taipuman arvot sekä hitaan että nopean muutosnopeuden kohteissa ovat huomattavan suuria taulukossa 5.1 pengerleveysmitoituksen yhteydessä esitettyihin raja-arvoihin verrattuna. Tämä selittyy todennäköisesti sillä, että taipuman tasoa ei mittaustuloksia käsiteltäessä ole kalibroitu oikealle tasolle.

Ero raidesepelin iässä selittyy todennäköisesti sepelin hienonemisella ja tiivistymisellä. Uuden, särmikkään sepelin särmät murtuvat ja pyöristyvät rakeet tiivistyvät ensimmäisinä vuosina nopeammin kuin ikääntynyt sepeli. Toisaalta nuoremmilla tukikerroksilla nopeasti ilmeneviä geometriaongelmia on voitu pyrkiä korjaamaan tukikerroksen seulonalla. Ongelma ei kuitenkaan ole ollut tukikerroksessa, jolloin nopean korkeuspoikkeaman muutosnopeuden syytä ei ole saatu korjattua, vaan ongelma jatkuu edelleen. Vanhemmalla tukikerroksella ongelmia geometrian heikkenemisnopeuden kanssa ei ole ollut alun perinkään, jolloin ei ole ollut tarvetta tukikerroksen seulonalle ja uuden sepelin lisäämiselle.

Yksi selittävä tekijä nopeaan korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen voi olla ojasyvyys ja rakennekerrosten kosteustila. Nopean ja hitaan korkeuspoikkeaman muutosnopeuden kohteiden ero ojasyvyyydessä on vasemmalla 1,71 m ja oikealla 0,63 m. Syvämpi oja mahdollistaa paremman kuivatuksen, jolloin erot ojasyvyyksissä johtavat todennäköisesti taulukossa 7.1 havaittuun eroon alusrakenteen ja pohjamaan kosteustiloissa hitaan ja nopean muutosnopeuden kohteissa. Hitaan muutosnopeuden kohteissa alusrakenteen kosteusindeksi on keskimääräistä pienempi (-0,33) ja pohjamaallakin vain hieman keskimääräistä suurempi (0,8). Nopean muutosnopeuden kohteissa sekä alusrakenteen että pohjamaan kosteusindeksit ovat selvästi keskimääräistä suuremmat. Kosteustilan kasvu altistaa rakenteen esimerkiksi routimiselle, joka aiheuttaa geometriavirheitä.

Leikkausten osuus on selvästi suurempi nopean muutosnopeuden kohteissa. Lähes kaikki tarkastellut leikkaukset olivat kallioleikkauksia. Leikkauspaikkojen korostuminen nopean muutosnopeuden kohteissa voi johtua leikkausten haastavasta kuivatustilanteesta ja kallioleikkauksessa korostuvista junakuormista. Kallioleikkauksissa lähes joustamaton pohja lisää tukikerrokseen kohdistuvia rasituksia, jotka hienontavat sepeliä normaalilannetta nopeammin. Suuri leikkauskohteiden määrä nopean muutosnopeuden kohteissa selittää osaltaan ojasyvyyksissä esiintyvää eroa. Leikkauksissa ojasyvyys on tyypillisesti huomattavasti pienempi kuin kohdissa, joissa rata on rakennettu penkereelle. Leikkauksissa kuivatuksen järjestäminen on usein haastavampaa matalien ojasyvyysien vuoksi.

Routaeristeiden vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen on vaikea arvioida. Hitaan muutosnopeuden kohteissa yhdessäkään ei ollut routaeristeitä, kun taas nopean muu-

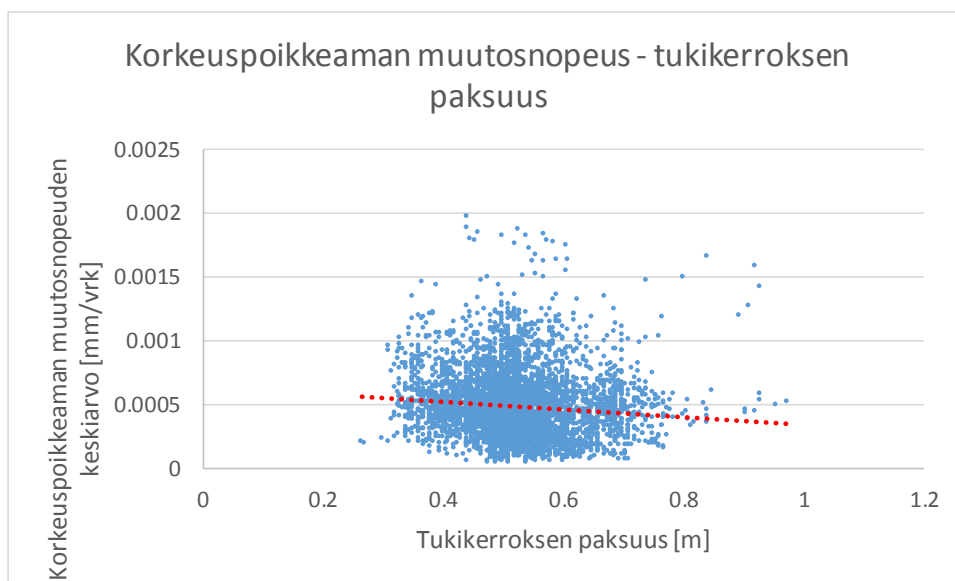
tosnopeuden kohteissa näin oli 15 % kohteista. Tulosten perusteella on vaikea sanoa, aiheuttavatko routaeristeet korkeuspoikkeaman muutosnopeuden kasvua, vai onko nopean muutosnopeuden kohteita pyritty korjaamaan lisäämällä routaeristeitä.

Pohjamaan maalajilla ei silmämääräisesti todettu olevan yhteyttä muutosnopeuden suuruuteen. Esimerkiksi liejuisella savella ja soramaalla esiintyy sekä nopean että hitaan muutosnopeuden kohteita. Pohjamaan vaikutusta tulisi kuitenkin tutkia tarkemmin.

Mitään yksittäistä syytä muutosnopeuden eroavaisuuksille ei kuitenkaan voida sanoa tämän tarkastelun pohjalta. Tarkasteluun valitut kohteet edustavat vain hyvin pientä osaa esimerkkikohteesta. Tarkasteluun valitut kohteet ovat molemmista ääripäistä, mikä voi vääristää tuloksia. Tarkastelu tulisikin toistaa huomattavasti suuremmalla havaintopisteiden määrällä.

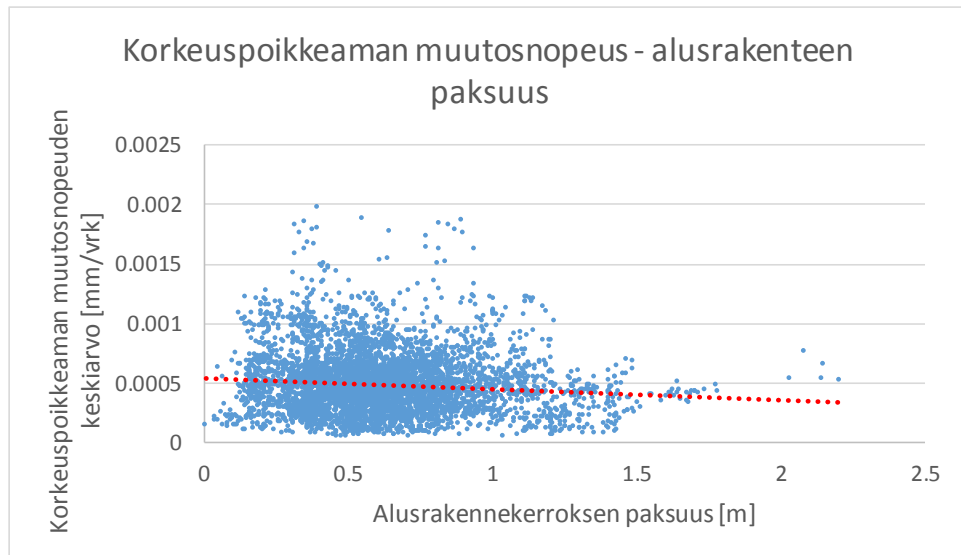
#### 7.4.2 Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – kerrospaksuudet

Laskettuja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden arvoja verrattiin vastaavien poikkileikkauksien kerrospaksuuksiin. Kerrospaksuudet määritettiin maatutkadatasta. Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden vertailut tukikerrokseen ja alusrakennekerrokseen on esitetty kuvissa 7.24 ja 7.25.



**Kuva 7.24** Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja tukikerroksen paksuus.

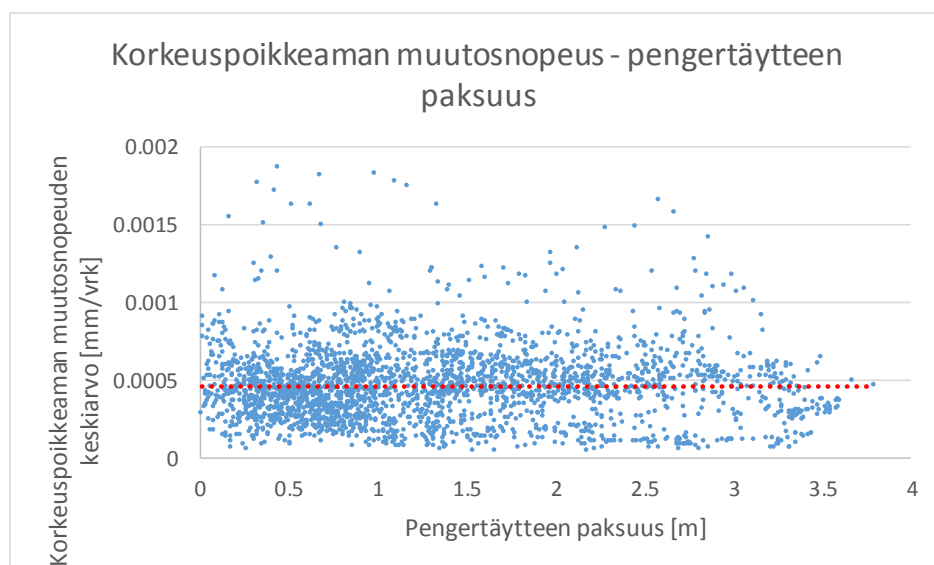
Paksu tukikerros näyttää trendiviivan mukaan pienentävän korkeuspoikkeaman muutosnopeutta. Tulosten hajonta on kuitenkin suurta. Aiemmin todettiin, että tukikerroksen paksuudella ei ole yhteyttä korkeuspoikkeaman keskimääräiseen suuruuteen. Paksumpi tukikerros näyttäisi kuitenkin hidastavan korkeuspoikkeaman kasvamista. Tukikerros todennäköisesti jäykistää ratarakennetta ja vähentää näin palautuvan ja pysyvän muodonmuutoksen syntymistä.



**Kuva 7.25** Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja alusrakennekerroksen paksuus.

Kuvan 7.25 perusteella myös paksumpi alusrakennekerros hidastaa korkeuspoikkeamien kasvua. Paksumpi alusrakennekerros lisää ratarakenteen joustavuutta, joten ratarakenteeseen kohdistuvat liikennekuormat voivat jakautua laajemmalle alueelle penkereessä. Pienempi rasitus voi selittää korkeuspoikkeaman hitaan muutosnopeuden paksulla alusrakennekerroksella, sillä pienempi rasitus aiheuttaa pienempiä pysyviä muodonmuutoksia, jotka voivat johtua esimerkiksi maamateriaalin hienonemisesta ja tiivistymisestä. Paksu alusrakenne tarkoittaa tyypillisesti myös korkeampaa pengertä. Kuten aiemmin todettiin, korkealla penkereellä rakenteen kuivatustila on tyypillisesti parempi, jolloin esimerkiksi routimisesta aiheutuva korkeuspoikkeaman kasvu jää vähäisemmäksi.

Kuvassa 7.26 on havainnollistettu korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja mahdollisen pengertäytteen paksuuden suhdetta.

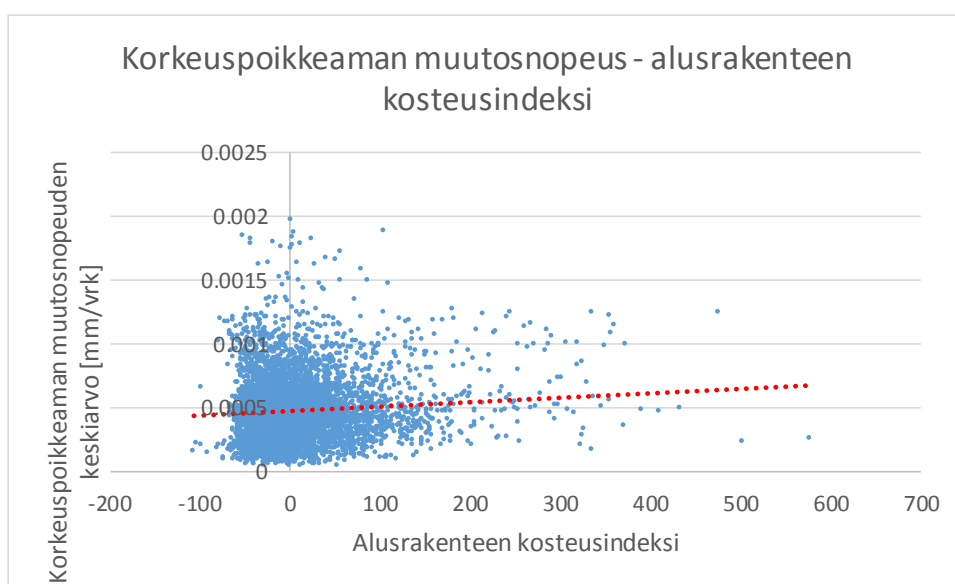


**Kuva 7.26** Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja pengertäytteen paksuus.

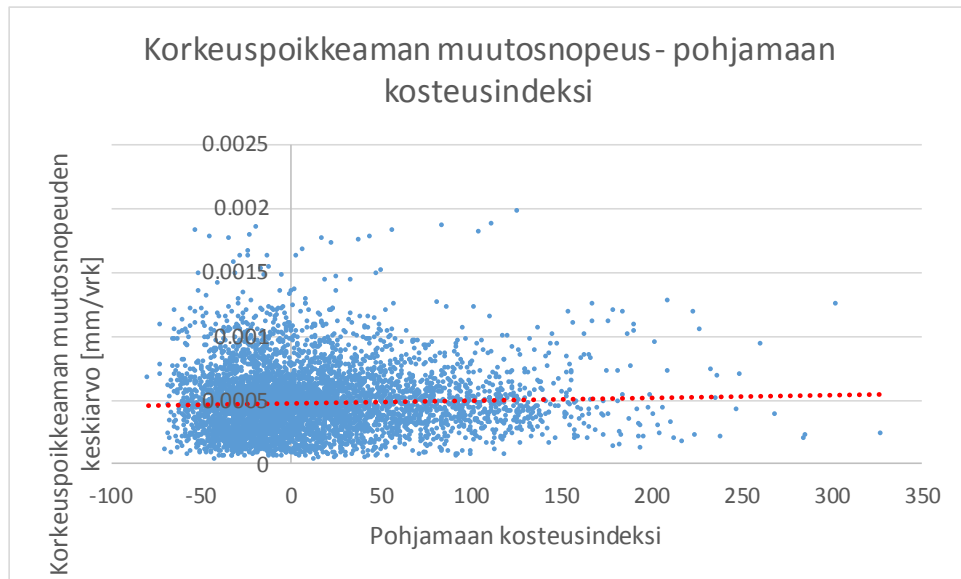
Pengertäytteen paksuuden ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden välillä ei voida havaita vaikutussuhdetta. Hajonta on suurta havaintopisteiden välillä.

### 7.4.3 Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – kosteustila ja ojasyvyys

Korkeuspoikkeaman muutosnopeutta on verrattu alusrakenteen ja pohjamaan kosteusindeksiin kuvissa 7.27 ja 7.28. Muutosnopeus kuvaa rataa syntyvää korkeuspoikkeamaa pitkältä ajanjaksolta, vuosilta 2007–2015. Kosteusindeksi taas kuvaa mittaushetken kosteustilaa, johon ovat vaikuttaneet esimerkiksi lähiaikojen sateet ja lämpötila. Kosteusindeksi antaa kuitenkin yleiskäsityksen radan kosteustilanteesta.



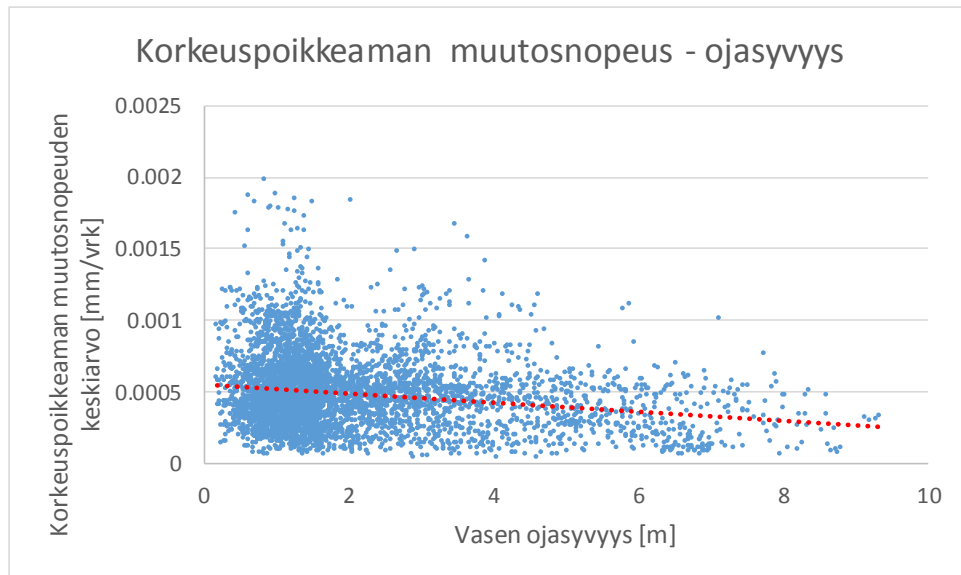
**Kuva 7.27** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja alusrakennekerroksen kosteusindeksi.



**Kuva 7.28** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja pohjamaan kosteusindeksi.

Rakennekerrosten kosteustilalla on jonkin verran vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen. Kosteustilaa kuvaavan kosteusindeksin kasvaessa alusrakenteessa tai pohjamaassa korkeuspoikkeaman muutosnopeus kasvaa. Alusrakenteessa ja pohjamaassa oleva kosteus kiihdyttää korkeuspoikkeaman syntymistä. Korkea kosteustila altistaa rakenteen esimerkiksi routimiselle, mikä voi lisätä huomattavasti korkeuspoikkeaman suuruutta.

Korkeuspoikkeaman muutosnopeutta verrattiin ojasyvyyteen kuvassa 7.29.



**Kuva 7.29** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja vasen ojasyvyys.

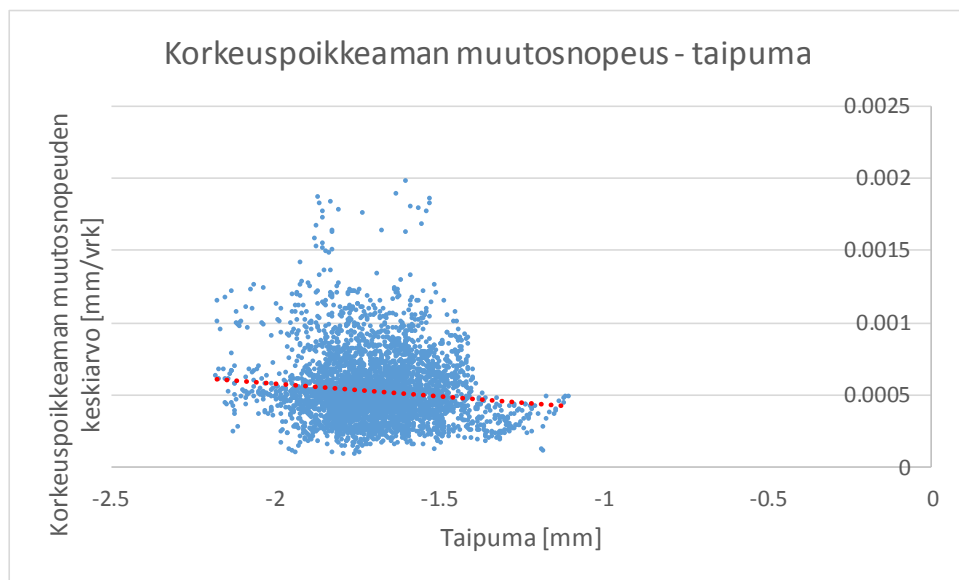
Ojasyvyyden vaikutus korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen on samansuuntainen kuin korkeuspoikkeaman ja ojasyvyyden suhde. Ojasyvyyden kasvaessa korkeuspoikkeaman



muutosnopeus pienenee. Kuten aiemmin jo todettiin, suuri ojasyvyys yleisesti parantaa kuivatusta.

#### 7.4.4 Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – taipuma

Korkeuspoikkeaman muutosnopeutta verrattiin myös radalta mitattuun taipumaan. Taipuma radalla on lähes ajasta riippumatonta, joten vaikka korkeuspoikkeaman muutosnopeus on määritetty pitkän ajanjakson mittauksista, on suureiden vertaaminen mielekästä. Vertailu on esitetty kuvassa 7.30.



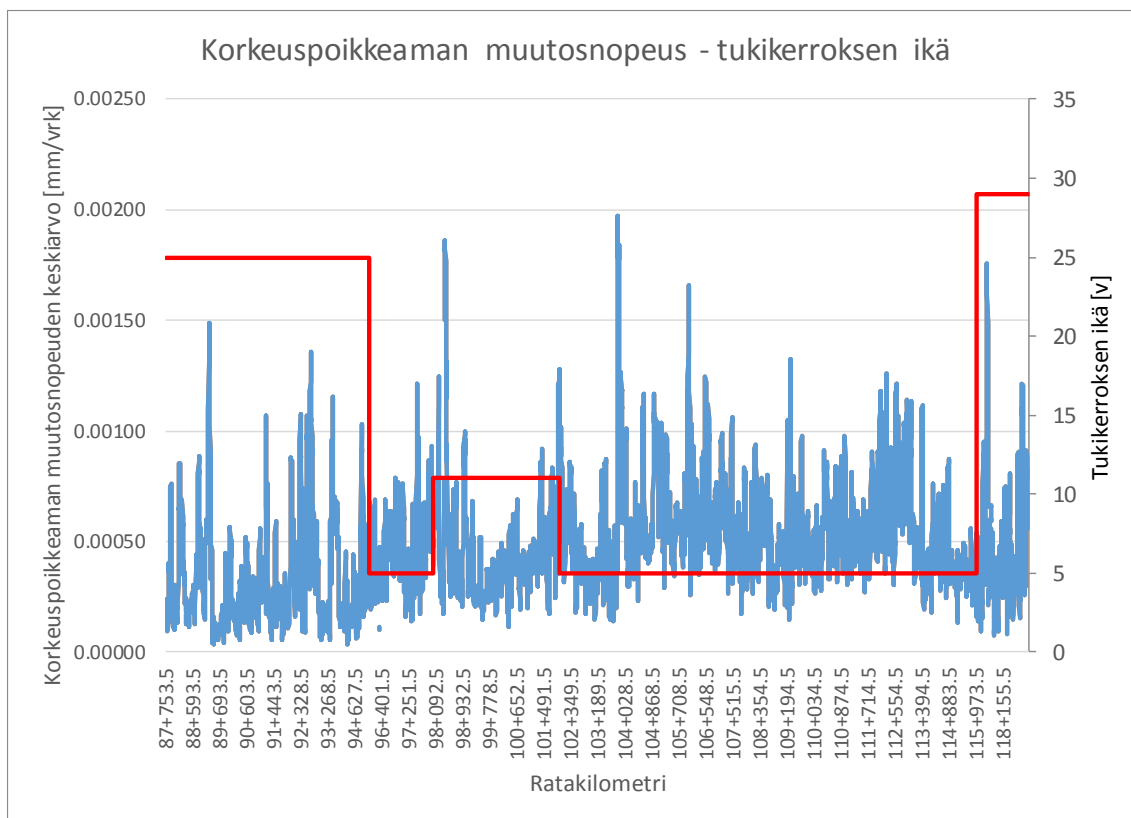
**Kuva 7.30** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo ja taipuma.

Kuvan 7.30 mukaan taipuman kasvaessa myös korkeuspoikkeaman muutosnopeus kasvaa. Joustavalla radalla korkeuspoikkeaman kasvu on siis nopeampaa. Joustavalla radalla rakennekerroksiin kohdistuvat kuormitukset ovat pienempiä kuin jäykällä rakenteella, mutta suurempi palautuva muodonmuutos ja suuremmat leikkausmuodonmuutokset altistavat rakenteen myös pysyvien muodonmuutosten syntymiselle. Joustavassa rakenteessa tapahtuva liike saa maapartikkelit järjestymään uudelleen. Rakenteessa tapahtuva tiivistyminen ja deformaatio havaitaan radan korkeuspoikkeaman kasvuna.

#### 7.4.5 Korkeuspoikkeaman muutosnopeus – tukikerroksen ikä

Kuvassa 7.31 on esitetty korkeuspoikkeaman muutosnopeuden keskiarvo sinisellä käyrällä ja tukikerroksen ikä vuosina punaisella käyrällä. Karjaa–Ervelä -välillä vanhin raidesepeli on vuodelta 1987. Suurin osa rataosan raidesepelistä on seulottu vuosina 2005 ja 2011, jolloin vanhasta raidesepelistä on seulottu pois hienontunut kiviaines. Poistetun kiviaineksen tilalle on lisätty uutta sepeliä. Kuvaajasta havaitaan, että vanhempaa sepeliä on osuuksilla, joilla korkeuspoikkeaman muutosnopeus on keskimäärin hitaampi. Vas-

taavasti osuuksilla, joilla raidesepeli on uudempaa, on korkeuspoikkeaman muutosnopeus keskimäärin suurempi. Esimerkiksi kilometrivälillä km 87–96 raidesepeli on 25 vuotta vanhaa ja korkeuspoikkeaman muutosnopeus on keskimäärin hidasta. Samoin välillä 116–119 muutosnopeus on keskimäärin hidasta ja tukikerroksen sepeli on 29 vuotta vanhaa. Välillä 102–116 tukikerroksen materiaali on uudempaa, viisi vuotta vanhaa sepeleä ja korkeuspoikkeaman muutosnopeus on keskimäärin melko suuri.



**Kuva 7.31** Korkeuspoikkeaman muutosnopeus ja tukikerroksen ikä.

Tukikerroksen iän vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen voidaan selittää sepelin hienontumisella ja tiivistymisellä. Vuosina 2005 ja 2011 seulotuille osuuksille on lisätty uutta, teräväsärmäistä raidesepeliä. Uudessa sepelissä olevat terävät särmät murtuvat helpommin kuin vanhemman sepelin pyöristyneet muodot. Uusi, hienontuva sepele tiivistyy junakuormien alla aiheuttaen muutoksia radan geometrisessa asemassa. Seulonta itsessäänkin aiheuttaa tukikerroksen löyhtymistä ja seulonnan jälkeen tukikerros alkaa tiivistyä.

## 7.5 Radan ominaisuuksien vertailu luokiteltujen mittausarvojen perusteella

Radan kuormituskestävyys on hyvin monimutkainen asia. Kuormituskestävyyden muodostumiseen vaikuttavat yhtäaikaaisesti monet asiat, joiden välille aiemmissa kappaleissa

tehtyjen vertailujen perusteella on vaikeaa löytää yksiselitteisiä syy-seuraussuhteita. Piirretyt kuvaajat sisältävät paljon hajontaa, sillä tarkasteltavissa kohteissa tilanteet ovat hyvin erilaisia ja sisältävät esimerkiksi pistemäisistä epäjatkuvuuskohdista aiheutuneita häiriöitä.

Kuormituskestävyyden monimutkaisuutta pyrittiin lähestymään luokittelujen avulla. Rata luokiteltiin erilaisiin luokkiin sen ominaisuuksien perusteella. Tarkasteltaviksi ominaisuuksiksi valittiin radalta mitattu taipuma, korkeuspoikkeaman hajonnan keskiarvon muutosnopeus, tukikerroksen ikä, tukikerroksen ja alusrakennekerroksen paksuus sekä alusrakenteen kosteusindeksi. Näiden suureiden todettiin aiemmissa vertailuissa olevan merkityksellisimpiä.

Kaikille suureille annettiin neljä luokkaa. Luokkarajoja määritettäessä huomioitiin suureen minimi- ja maksimiarvot sekä arvojen jakautuminen niiden välille. Rajoja määritettäessä pyrittiin varmistamaan, että kaikissa luokissa esiintyy riittävä määrä arvoja, vaikka arvojen jakautuminen luokkiin ei olekaan tasaista. Tukikerroksen paksuuden luokat määritettiin niin, että raidesepelistä rakennettavan tukikerroksen ohjeellinen paksuus 0,55 metriä on keskimmäisten luokkien 2 ja 3 rajana. Luokissa 1 ja 2 tukikerroksen paksuus on siis ohjearvoa pienempi ja luokissa 3 ja 4 ohjearvoa suurempi. Alusrakenteen kosteusluokka 1 määritettiin kuvaamaan tilannetta keskimääräistä kuivemmissä olosuhteissa, eli kun kosteusindeksi on negatiivinen. Luokkien määräytyminen on kuvattu taulukossa 7.2.

**Taulukko 7.2** Radan luokitteluun käytettävien suureiden luokitteluperusteet.

	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3	Luokka 4
Taipuma [mm]	< 1.5	1.5-1.75	1.75-2.0	> 2.0
Korkeuspoikkeaman muutosnopeus	0-0.0005	0.0005-0.001	0.001-0.0015	0.0015-0.002
Alusrakennekerroksen paksuus [m]	0-0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
Tukikerroksen paksuus [m]	< 0.45	0.45-0.55	0.55-0.65	> 0.65
Alusrakenteen kosteusindeksi	< 0	0-100	100-200	200-300
Tukikerroksen ikä [v]	5	11	25	29

Luokkien määrittämisen jälkeen kaikille tarkasteltaville radan poikkileikkauksille ja poikkileikkauksessa esiintyville suureille määritettiin taulukon 7.2 mukainen luokka 1–4. Tukikerroksen iälle käytettiin luokkien nimenä tukikerroksen ikää vuosina, eli luokat 5, 11, 25 ja 29. Samalla poikkileikkauksella on siis useita luokkia riippuen tarkasteltavien suureiden arvosta poikkileikkauksessa.

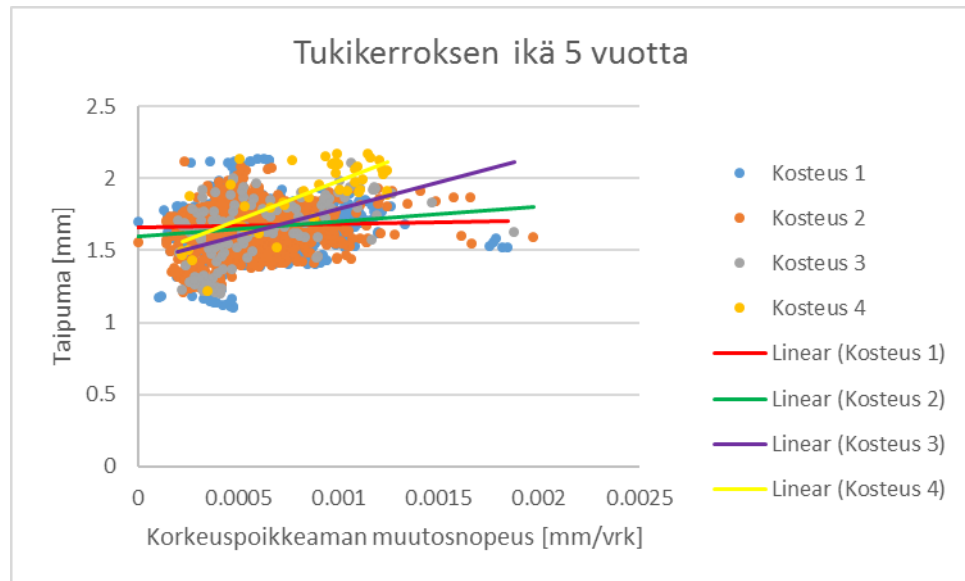
Luokittelujen avulla voidaan verrata samanaikaisesti useampaa kuin kahta suuretta. Luokittelun avulla voidaan tarkastella tiettyjen ominaisuuksien tai olosuhteiden suhteen samanlaisia poikkileikkauksia, jolloin voidaan eliminoida kyseisten suureiden vaikutus tuloksiin.

### **7.5.1 Korkeuspoikkeaman muutosnopeus - taipuma eri kosteustiloissa, sepelin ikä vakio**

Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja radalta mitatun palautuvan jouston voidaan olettaa kuvaavan radan kokonaiskuormituskestävyyttä. Aiemmassa kappaleessa 7.4.4 korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja taipuman välillä havaittiin yhteys. Teoriassa mittaamalla radan taipumaa voitaisiin ennustaa korkeuspoikkeaman muutosnopeus eli määrittää radan kuormituskestävyys poikkileikkauksittain. Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja taipuman suhteeseen vaikuttavat kuitenkin monet muut asiat, joiden vaikutus tulee tuntea ennen kuin kuormituskestävyyttä voidaan ennustaa radan taipumaa mittaamalla.

Aiemmissa vertailuissa todettiin, että sepelin iällä ja alusrakenteen kosteustilalla on vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen. Kosteustilan vaikutusta jouston ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhteeseen tutkittiin luokittelemalla poikkileikkaukset ensin tukikerroksen iän perusteella homogeenisiin joukkoihin. Esimerkkikohteessa ei ole mitattu taipumaa osuudelta, jolla tukikerroksen ikä on 25 vuotta. Syntyneissä kolmessa luokassa (tukikerroksen ikä 5, 11 ja 29 vuotta) poikkileikkaukset luokiteltiin edelleen kosteustilan luokkiin 1–4. Kuvaajat taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhteen piirrettiin erikseen jokaisessa kosteusluokassa.

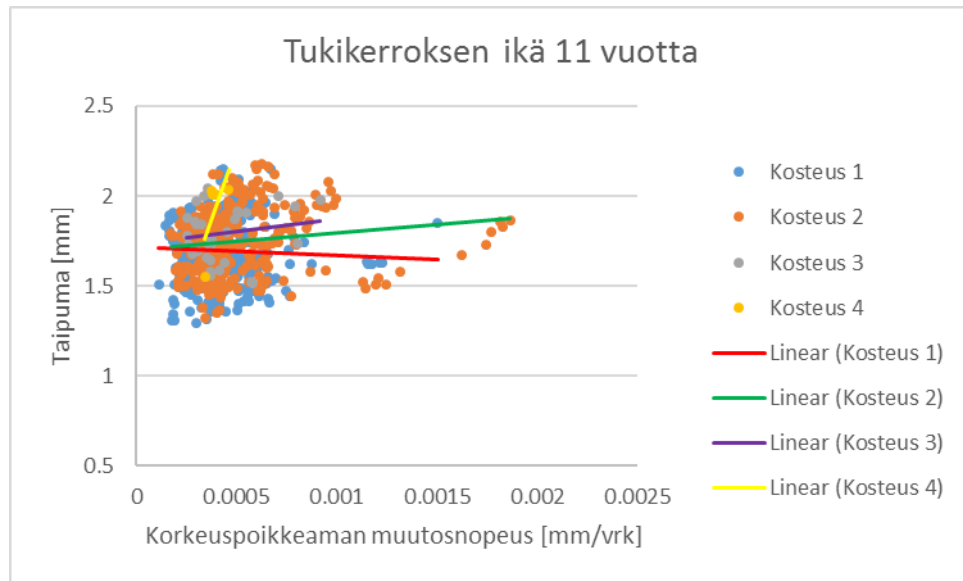
Kuvassa 7.32 on esitetty taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeus eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 5 vuotta. Kuvassa on esitetty punaisella trendiviivalla tilannetta kosteusluokassa 1 eli keskimääräistä kuivemmissa olosuhteissa. Vihreällä trendiviivalla on kuvattu tilannetta kosteusluokassa 2 ja violetilla trendiviivalla kosteusluokassa 3. Keltaisella trendiviivalla on kuvattu tilannetta kosteusluokassa 4, eli kun alusrakenteen kosteustila on suurimmillaan tutkittavalla rataosuudella.



**Kuva 7.32** Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 5 vuotta.

Kuvasta 7.32 havaitaan, että alusrakenteen kosteustila vaikuttaa jouston ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhteeseen. Kaikkein kuivimmassa olosuhteissa (alusrakenteen kosteusluokka 1) taipuman suuruus on lähes vakio korkeuspoikkeaman muutosnopeudesta riippumatta. Alusrakenteen kosteustilan kasvaessa taipuma kasvaa ja nopeuttaa pysyvien muodonmuutosten syntymistä.

Kuvassa 7.33 on esitetty vastaava kuvaaja, kun tukikerroksen ikä on 11 vuotta. Trendiviivojen värit ovat kuten aiemmassa kuvassa: punainen trendiviiva kuvaa kaikkein kuivinta tilannetta, vihreä hieman keskimääräistä kosteampaa tilannetta, violetti vielä kosteampaa tilannetta ja keltainen kaikkein kosteinta tilannetta.

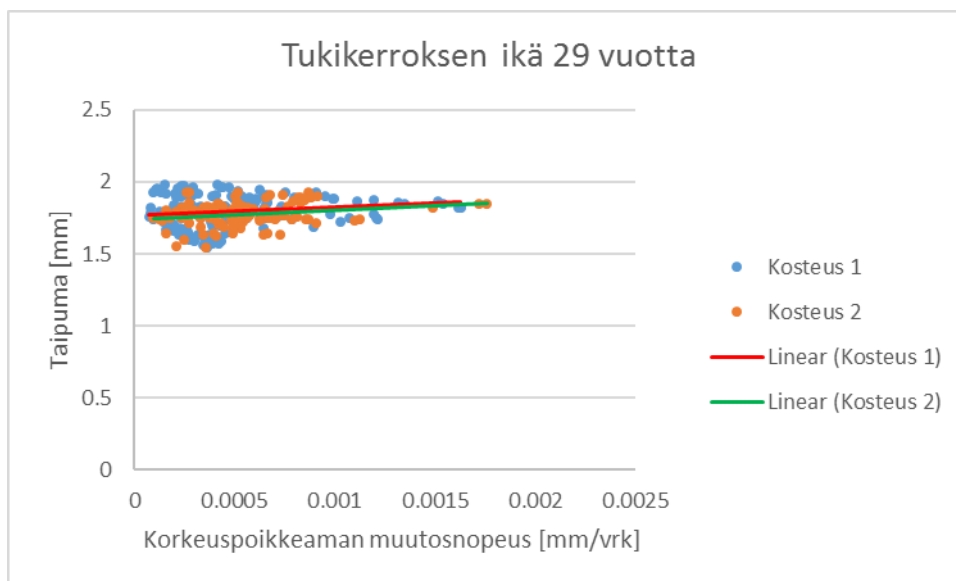


**Kuva 7.33** Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 11 vuotta.

Kuvan 7.33 perusteella taipuman arvo näyttäisi jopa pienentyvän korkeuspoikkeaman muutosnopeuden kasvaessa kaikkein kuivimmissa olosuhteissa. Tämä johtuu todennäköisesti havaintopisteiden määrästä ja tarkastelutapaan liittyvistä epätarkkuuksista. Keskimääräistä kosteammassa olosuhteissa korkeuspoikkeaman muutosnopeus kasvaa taipuman kasvaessa sitä enemmän, mitä kosteampi alusrakenne on. Taipuman suuruusluokka on sama sekä 5 vuotta vanhalla tukikerroksella että 11 vuotta vanhalla tukikerroksella. Korkeuspoikkeaman muutosnopeus vaikuttaa olevan 11 vuoden ikäisellä tukikerroksella keskimäärin hieman pienempi kuin uudemmalla, 5 vuotta vanhalla tukikerroksella, mutta tämä voi johtua pienemmästä havaintopisteiden määrästä.

Osuudesta, jolla tukikerroksen ikä on 25 vuotta, ei ole saatavilla taipumatietoa.

Kuvassa 7.34 on esitetty taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde kosteustilaluokissa 1 ja 2, kun tukikerroksen ikä on 29 vuotta. Kosteusluokkaa 1 on kuvattu punaisella ja kosteusluokkaa 2 vihreällä trendiviivalla.



**Kuva 7.34** Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 29 vuotta.

Huomattavaa on, että kosteusluokkia 3 ja 4 ei juurikaan esiinny rataosuudella, jossa tukikerros on vanhimmillaan. Voidaankin ajatella, että kyseisellä rataosuudella riittävä ja toimiva kuivatus ja paremmat rakennekerrosmateriaalit pitävät radan alusrakenteen kosteus-tilan pienenä. Tällöin radan kuormituskestävyys on ollut parempi kuin ympäröivillä osuuksilla. Paremmasta kuormituskestävyydestä johtuen tukikerroksen uusimiselle ei ole ollut tarvetta.

Nuoremmilla tukikerroksilla tehtyjen vertailujen perusteella voidaan todeta, että alusrakenteen kosteus-tilalla on vaikutusta taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden väliseen suhteeseen. Taipuman arvoa vastaava korkeuspoikkeaman muutosnopeus on sitä suurempi, mitä kosteampi alusrakenne on.

Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhteeseen vaikuttavia muita tekijöitä voivat olla esimerkiksi rakennekerrosten paksuudet ja materiaaliominaisuudet sekä radan epäjatkuvuuskohdat.

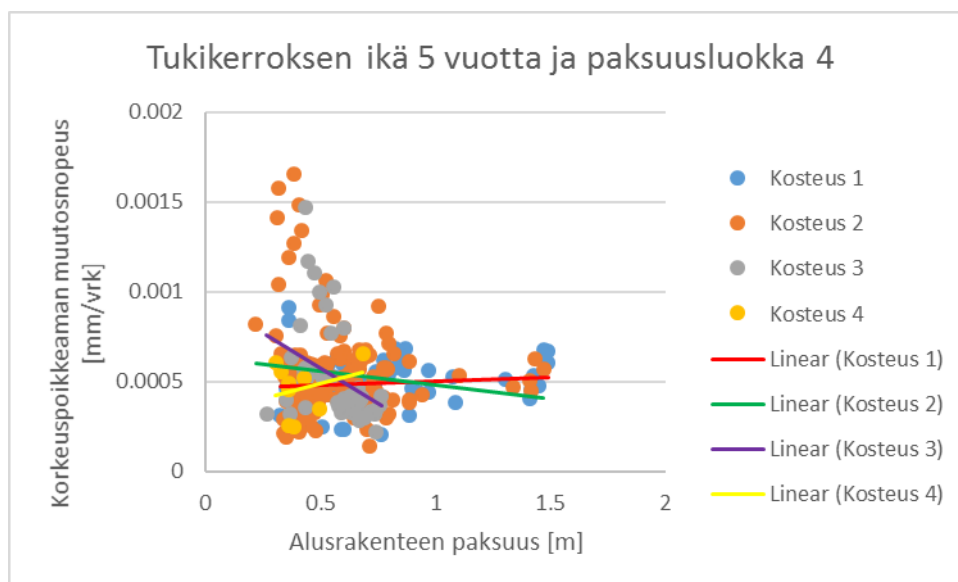
### 7.5.2 Korkeuspoikkeaman muutosnopeus - alusrakenteen paksuus eri kosteus-tiloissa, tukikerroksen ikä ja paksuus vakio

Aiemmin kappaleessa 7.4.2 todettiin, että alusrakenteen paksuudella on vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen. Tehdyn vertailun perusteella korkeuspoikkeaman muutosnopeus kasvaa alusrakenteen ohentuessa. Luokitteluun perustuvan vertailun avulla alusrakenteen paksuuden vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen verrattiin vakioimalla tukikerroksen ikä ja paksuus. Vakioimalla tukikerroksen ominaisuudet

voidaan eliminoida niiden vaikutus korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen. Tukikerroksen iän ja paksuuden yhdistelmällä saatiin aikaan 16 joukkoa, joissa tukikerroksen ominaisuudet pysyvät vakioina. Nämä osajoukot luokiteltiin edelleen neljään luokkaan alusrakenteen kosteusindeksin perusteella, jotta alusrakenteen kosteustila voidaan huomioida vertailussa.

Tässä raportissa esitellään vain yksi vertailu jokaisesta tukikerroksen ikäluokasta, sillä kuvaajien piirtäminen kaikista 16 joukosta ei onnistunut tai ollut mielekäästä vähäisten havaintopistemäärien vuoksi.

Kuvassa 7.35 on esitetty korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteustiloissa, kun tukikerroksen ikä on 5 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 4 eli tukikerros on paksuimmillaan ( $>0,65$  m). Kuten aiemmissakin vertailuissa, punaisella trendiviivalla on kuvattu keskimääräistä kuivempaa tilannetta ja keltaisella trendiviivalla kaikkein kosteinta alusrakenteen tilaa.

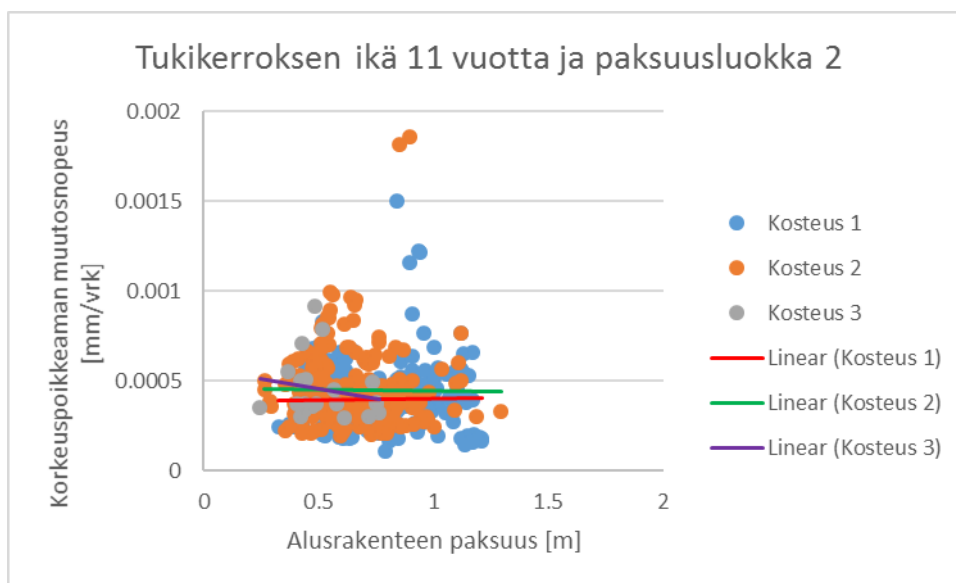


**Kuva 7.35** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 5 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 4.

Alusrakenteen kosteustilalla ei näytä olevan yhtenäistä vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhteeseen. Kosteustilan ääriluokissa alusrakenteen paksuuden kasvaessa korkeuspoikkeaman muutosnopeus vaikuttaa kasvavan, mutta kosteusluokissa 2 ja 3 korkeuspoikkeaman muutosnopeus pienenee alusrakenteen paksuuden kasvaessa. Vaikutussuhteet eivät siis ole samansuuntaisia. Vähäinen havaintopistemäärä todennäköisesti selittää kosteustilan 4 trendiviivan poikkeavan suunnan. Pistejoukon muodosta voidaan kuitenkin todeta sama kuin aiemmissa vertailuissa: alusrakenteen paksuuntuessa korkeuspoikkeaman muutosnopeus keskimäärin pienenee.



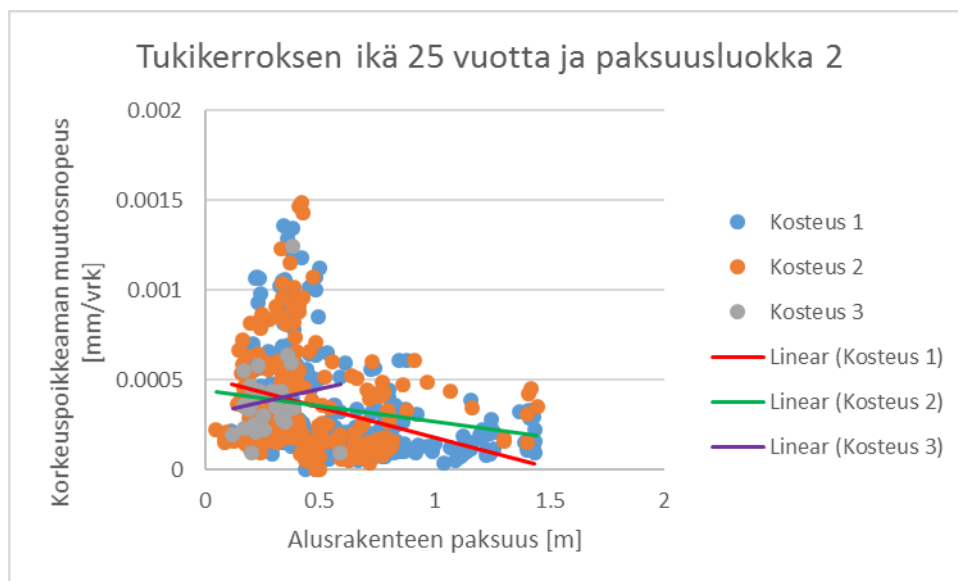
Kuvassa 7.36 on esitetty vastaava vertailu, kun tukikerroksen ikä on 11 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 2. Tukikerroksen paksuusluokassa 2 tukikerroksen paksuus on hieman alle betonipölkkyraiteen ohjeellisen paksuuden (0,55 m). Kosteusluokkaan 4 asetuvia havaintopisteitä ei osu tukikerroksen ominaisuuksien perusteella määritettyyn joukkoon. Punaisella trendiviivalla on kuvattu keskimääräistä kuivempaa tilannetta, vihreällä kosteustilaa 2 ja violetilla kosteustilaa 3.



**Kuva 7.36** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 11 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 2.

Alusrakenteen kosteusluokissa 1 ja 2 alusrakennekerroksen paksuudella ei näytä olevan vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen. Sen sijaan kosteustilan kasvu luokasta 1 luokkaan 2 nostaa hieman korkeuspoikkeaman muutosnopeuden tasoa. Alusrakenteen kosteustilassa 3 paksumpi alusrakennekerros sen sijaan pienentää korkeuspoikkeaman muutosnopeutta, kuten aiemmissakin vertailuissa todettiin.

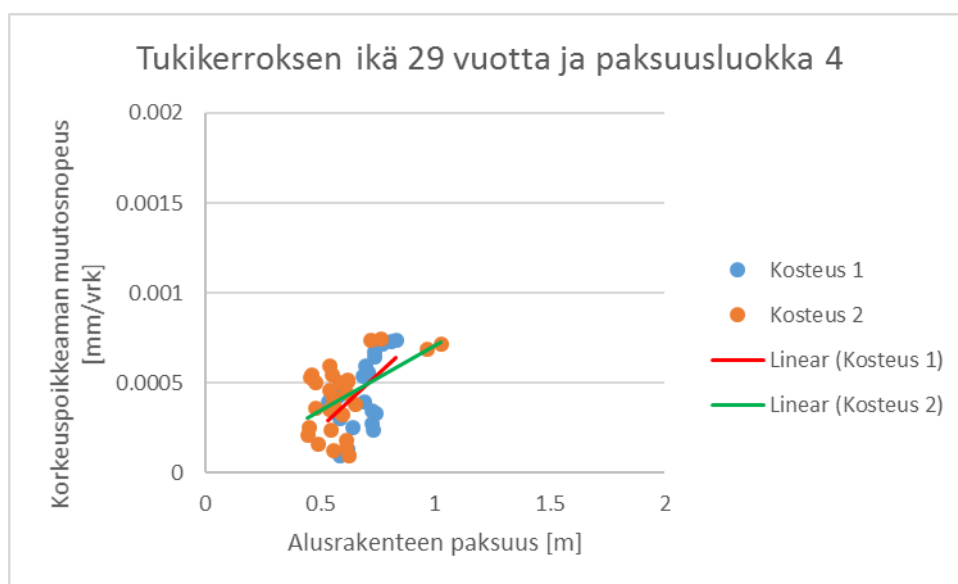
Kuvassa 7.37 on esitetty korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde alusrakenteen eri kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 25 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 2. Punaisella trendiviivalla on kuvattu tilannetta keskimäärin kuivemmalla alusrakenteella. Vihreällä ja violetilla trendiviivalla on kuvattu kosteampia alusrakenteita. Myöskään tässä tukikerroksen ominaisuuksien perusteella määritetyssä havaintopistejoukossa ei esiinny alusrakenteen kosteusluokkaa 4.



**Kuva 7.37** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 25 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 2.

Alusrakenteen kosteusluokalla näyttäisi kuvan 7.37 perusteella olevan vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhteeseen. Kosteusluokissa 1 ja 2 paksummalla alusrakenteella esiintyvä korkeuspoikkeaman muutosnopeus on keskimäärin pienempi kuin ohuella alusrakenteella. Kosteusluokassa 1 vaikutus on suurempi kuin kosteusluokassa 2. Kosteusluokassa 3 vaikutus on päinvastainen: paksummalla alusrakenteella korkeuspoikkeaman muutosnopeus on suurempi kuin ohuella alusrakenteella. Poikkeavan suunnan voi kuitenkin selittää kosteusluokan 3 vähäinen havaintopistemäärä, sillä yksittäisen havainnon vaikutus trendikäyrän suuntaan on tällöin suurempi.

Kuvassa 7.38 on esitetty korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde alusrakenteen kosteusluokan mukaan, kun tukikerroksen ikä on 29 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 4. Kosteusluokan 1 mukaista tilannetta on kuvattu punaisella trendiviivalla ja kosteusluokka 2 vihreällä trendiviivalla. Vanhimmallalla tukikerroksella ei esiinny havaintopisteitä, joissa alusrakenteen kosteusluokka on 4 ja vain muutama yksittäinen havaintopiste, jossa alusrakenteen kosteusluokka on 3.



**Kuva 7.38** Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä on 29 vuotta ja tukikerroksen paksuusluokka on 4.

Kuvassa 7.38 kuvatussa tilanteessa korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhde on päinvastainen kuin edellisissä kuvissa 7.35, 7.36 ja 7.37. Trendiviivojen mukaan paksulla alusrakenteella korkeuspoikkeaman muutosnopeus on suurempi kuin ohuella alusrakenteella. Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden vaihteluväli on selvästi kapeampi kuin nuoremmilla tukikerroksilla. Havaintopisteiden määrä on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin nuoremmilla tukikerroksilla, mikä osaltaan vaikuttaa saatuihin tuloksiin.

Alusrakenteen kosteustilalla voidaan todeta olevan vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhteeseen, mutta vaikutus ei ole selkeä eikä yhdenmukainen. Voidaankin päätellä, että korkeuspoikkeaman ja alusrakenteen paksuuden suhteeseen vaikuttaa merkittävästi myös muita tekijöitä. Muita tekijöitä voivat olla esimerkiksi tukikerroksen ja alusrakenteen paksuuden välinen suhde, alusrakennemateriaalit, radan jäykkyys sekä radassa esiintyvät epäjatkuvuuskohdat, kuten sillanpäädät ja rummut. Kappaleessa 7.4.1 todettiin, että suuria korkeuspoikkeaman muutosnopeuden arvoja esiintyy etenkin kallioleikkauksissa, joissa alusrakenteen paksuus on tyypillisesti ohut. Näiden tekijöiden vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakenteen paksuuden suhteeseen tulisi myös tarkastella. Tämän tutkimuksen yhteydessä havaintopisteiden määrä rajoitti verrattavien ominaisuuksien määrää.

## 7.6 Yhteenveto tuloksista

Tässä tutkimuksessa käytetyn lähtötietodatan kohdistaminen ei ole ongelmaton. Arvoja on jouduttu esimerkiksi interpoloimaan, jotta ollaan saatu vertailukelpoisia arvoja tarkasteltaville poikkileikkauksille. Tästä johtuen kaikki tarkasteltavat poikkileikkaukset eivät välttämättä vastaa todellista tilannetta.

### 7.6.1 Vertailut lähtötietojen välillä

Ominaisuuksien vertailusta saadut tulokset on koottu taulukkoon 7.3. Vihreällä pohjavärillä merkityissä vertailuissa havaittiin yhteys tarkasteltavien suureiden välillä. Punaisella merkityissä vertailuissa yhteyttä ei havaittu. Keltaisella pohjavärillä merkityissä vertailuissa ominaisuuksien välinen yhteys oli hyvin heikko tai epäselvä. Ylöspäin osoittava nuoli kuvaa tilannetta, jossa rivillä olevan suureen kasvu aiheuttaa pystysarakkeessa olevan suureen kasvua. Alaspäin suuntaavalla nuolella kuvataan päin vastaista suhdetta: rivillä olevan suureen kasvu aiheuttaa sarakkeessa olevan suureen pienenemistä.

**Taulukko 7.3** Yhteenvedotaulukko lähtötietojen vertailusta. Punaisella merkittyjen ominaisuuksien välillä ei havaittu yhteyttä, vihreällä värillä merkittyjen ominaisuuksien välillä havaittiin yhteys ja keltaisella merkittyjen ominaisuuksien välinen yhteys oli epäselvä.

	Korkeuspoikkeama	Taipuma	Korkeuspoikkeaman muutosnopeus
Tukikerroksen paksuus		↘	↘
Alusrakennekerroksen paksuus	↘	↗	↘
Pengertäytteen paksuus	↘		
Alusrakenteen kosteusindeksi	↗	↗	↗
Pohjamaan kosteusindeksi	↗		↗
Ojasyvyys	↘	↗	↘
Taipuma		X	↗
Tukikerroksen ikä			↘

- Ei havaittua yhteyttä tarkasteltavien suureiden välillä  
 Heikko tai epäselvä yhteys tarkasteltavien suureiden välillä  
 Havaittu yhteys tarkasteltavien suureiden välillä  
 Vasemmalla olevan suureen kasvaminen kasvattaa sarakkeen suuretta  
 Vasemmalla olevan suureen kasvaminen pienentää sarakkeen suuretta

Taulukosta nähdään, että alusrakennekerroksen paksuudella on vaikutussuhde sekä taipumaan, korkeuspoikkeamaan että korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen. Sen sijaan tukikerroksen paksuus vaikuttaa vain taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suuruuteen. Tämä on yllättävää, sillä tukikerroksessa tapahtuvan hienonemisen ja tiivistymisen voisi ajatella olevan merkittävä tekijä korkeuspoikkeaman syntymisessä. Pengertäytteellä ei tarkastelun mukaan ole tai sillä on hyvin vähän vaikutusta taipumaan, korkeuspoikkeamaan tai sen muutosnopeuteen. Tulos voi johtua mittausmenetelmistä, sillä esimerkiksi taipumamittauksen mittakanta ei välttämättä ole riittävä pengertäytteen syvyydessä tapahtuvalle taipumalle.

Alusrakennekerroksen paksuuden vaikutus korkeuspoikkeamaan ja sen muutosnopeuteen on erisuuntainen kuin taipumaan. Tästä voidaan päätellä, että alusrakennekerros lisää radan joustavuutta, jolloin kuormitusten jakautuminen ratapenkereessä on tasaisempaa eikä rakenne ole niin altis korkeuspoikkeamalle ja sen muutosnopeus pysyy pienempänä.

Alusrakenteen ja pohjamaan kosteusindeksien todettiin vaikuttavat korkeuspoikkeaman suuruuteen, mutta vain hyvin heikosti tai ei ollenkaan taipuman arvoon. Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhteen vaikutus oli epäselvä.

Ojasyvyydellä taas on merkitystä sekä korkeuspoikkeaman että taipuman suuruuteen. Ojasyvyyden kasvaminen pienentää korkeuspoikkeamaa, mutta lisää taipumaa. Suurempi ojasyvyys todennäköisesti parantaa rakenteen kuivatusta. Ristiriitaista on kuitenkin se, että ojasyvyyden ja tarkasteltavien suureiden välillä havaittiin selvä yhteys, mutta alusrakenteen ja pohjamaan kosteusindeksien vaikutus taipumaan ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen oli hyvin epäselvä. Alhaisemman alusrakenteen kosteusindeksin todettiin kuitenkin pienentävän korkeuspoikkeamaa. Suurempi taipuma suurella ojasyvyydellä selittyy korkean penkereen suuremmilla palautuvilla muodonmuutoksilla.

Taipuman ja korkeuspoikkeaman välillä ei havaittu yhteyttä. Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden välillä sen sijaan havaittiin yhteys. Taipuma ei vaikuta keskimääräiseen korkeuspoikkeaman suuruuteen, mutta suuri taipuma ennakoi suurempaa korkeuspoikkeaman muutosnopeutta. Suuret palautuvat painumat nopeuttavat siis pysyvien muodonmuutosten syntymistä riippumatta pysyvän muodonmuutoksen suuruudesta.

Sepelin ikä vaikuttaa sekä korkeuspoikkeamaan että sen muutosnopeuteen. Taipuman kannalta sepelin iällä ei ole merkitystä.

Taulukon 7.3 perusteella tuloksissa on kuitenkin havaittavissa ristiriitoja. Alusrakenteen paksuuden todettiin vaikuttavan korkeuspoikkeamaan ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen niin, että paksummalla alusrakenteella kyseiset arvot pienenevät. Taipuman suhteen vaikutus oli päinvastainen: paksu alusrakenne kasvattaa taipuman arvoa. Toisaalta taipuman arvon kasvamisen todettiin kasvattavan korkeuspoikkeaman muutosnopeutta, mikä taas on ristiriidassa alusrakenteen paksuuden vaikutuksiin. Taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden välillä havaittu yhteys ei kuitenkaan ollut yhtä selvä kuin alusrakenteen paksuuden vaikutus taipumaan, korkeuspoikkeamaan ja sen muutosnopeuteen.

Yksittäisten ominaisuuksien vertailu todettiin riittämättömäksi tavaksi tutkia radan ominaisuuksien vaikutussuhteita.

## 7.6.2 Vertailut luokittelun perusteella

Luokitteluperusteiseen vertailuun valittiin 6 muuttujaa aiempien vertailujen tulosten perusteella. Tarkasteltaviksi muuttujiksi valittiin korkeuspoikkeaman muutosnopeus, taipuma, tuki- ja alusrakennekerroksen paksuus, alusrakenteen kosteusindeksi ja sepelin ikä. Muuttujat luokiteltiin neljään luokkaan 1–4. Ensimmäinen vertailu tehtiin taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden välillä eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tuki-

kerroksen ikä pidettiin vakiona. Toinen vertailu tehtiin korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakennekerroksen paksuuden välillä, kun tukikerroksen ominaisuudet, eli ikä ja paksuus, pidettiin vakiona.

Ensimmäisen vertailun perusteella havaittiin, että alusrakenteen kosteusluokan muuttuminen vaikuttaa taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhteeseen nuorimmilla tarkastelluilla tukikerroksilla. Alusrakennekerroksen kosteustilan kasvaessa korkeuspoikkeaman muutosnopeutta vastaava taipuman arvo kasvaa. Vanhimmalla, 29 vuotta vanhalla tukikerroksella vaikutusta ei havaittu. Vanhimmalla tukikerroksella havaintopisteiden määrä oli selvästi pienempi kuin nuoremmilla tukikerroksilla, mikä voi osaltaan selittää tulosta.

Toisen vertailun perusteella ei havaittu selkeää, yhtenäistä vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakennekerroksen paksuuden ja kosteustilan välillä. Osassa tarkastelluista luokista havaittiin, että alusrakennekerroksen paksuus keskimäärin pienentää korkeuspoikkeaman muutosnopeutta. Vaikutus ei kuitenkaan ollut havaittavissa kaikissa tarkastelujoukoissa. Voidaan siis todeta, että alusrakennekerroksen ominaisuuksilla on vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen, mutta se ei ole ainoa siihen vaikuttava tekijä. Osittain tuloksia voi selittää havaintopisteiden vähäinen määrä. Vertailu tulisikin suorittaa runsaammalla havaintopistemäärällä, jotta kaikkiin luokkiin saataisiin riittävästi havaintopisteitä, tai muuttamalla luokitteluehtoja.

Luokittelujen yhteydessä havaittiin myös, että vanhimmilla tukikerroksilla alusrakenteen kosteustila oli keskimääräistä kuivempi. Vanhimmilla tukikerroksilla (25 ja 29 vuotta) ei esiinny lainkaan tai esiintyy ainoastaan yksittäisiä havaintopisteitä mörkimmissä alusrakenteen kosteusluokissa 3 ja 4. Tulos voi kertoa siitä, että alusrakenteen kuivatusongelmat ovat aiheuttaneet geometriavirheitä, joita on pyritty korjaamaan tukikerrosta uudella.

## 8. PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

### 8.1 Tutkimuksen tulokset

Kuormituskestävyysmitoituksen tarkoituksena on pyrkiä radan tasaiseen vanhenemiseen sekä ratalinjan että radan rakenneosien tasolla. Jotta tulevaisuudessa voitaisiin kehittää radan kuormituskestävyyteen perustuva mitoitusmenetelmä, tulisi radan ominaisuuksien vaikutussuhteet tuntea selvästi nykyistä paremmin. Radan käyttöikä ja tarvittavan perusparannuksen ajankohta voidaan kuormituskestävyysmitoituksen avulla ennustaa paremmin. Tasaisella ikääntymisellä voidaan pienentää radan elinkaarikustannuksia, kun radan yksittäisten ongelmakohtien vaatimia kunnossapitotoimenpiteitä voidaan vähentää.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin kirjallisuusselvityksellä radan kuormituskestävyyteen vaikuttavia asioita, olemassa olevalta radalta saatavia lähtötietoja sekä toimenpiteitä, joilla olemassa olevan radan kuormituskestävyyttä voidaan parantaa. Lyhyesti käsiteltiin myös muutamia mitoitusmenetelmiä, joiden pohjalta kuormituskestävyysmitoitusta voitaisiin tulevaisuudessa kehittää. Radan kuormituskestävyyteen vaikuttavien ominaisuuksien vaikutussuhteita tarkasteltiin esimerkkikohteesta saatujen lähtötietojen avulla.

Kirjallisuusselvityksen perusteella löydettiin lukuisia radan kuormituskestävyyteen vaikuttavia seikkoja. Kuormituskestävyyteen vaikuttavat ratarakenteen lisäksi pohjamaan ominaisuudet, ympäristöolosuhteet ja junakuormat. Erikoisrakenteen, kuten sillat ja paalulaatat, rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle. Nämä kuormituskestävyyteen vaikuttavat asiat muodostavat hyvin monimutkaisen kokonaisuuden, jossa yksittäistä ominaisuutta ei voida tarkastella irrallaan kokonaisuudesta.

Työssä tarkasteltiin muutamia rata- tai tiesuunnittelussa käytettäviä kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmiä. Minkään näistä menetelmistä ei todettu soveltuvan sellaisenaan sovellettavaksi radan kuormituskestävyysmitoituksessa tai Suomen ilmasto-olosuhteissa. Käsitellyt mitoitusmenetelmät eivät myöskään suoranaisesti mitoita ratarakennetta sen kuormituskestävyyden suhteen.

Esimerkkikohteen tarkastelulla etsittiin vaikutussuhteita saatavilla olevien lähtötietojen välillä. Näitä lähtötietoja olivat esimerkiksi tuki- ja alusrakennekerroksen kerrospaksuudet, alusrakenteen ja pohjamaan kosteusindeksi, korkeuspoikkeama ja taipuma. Radan kuormituskestävyyttä kuvaamaan luotiin esimerkkikohteen lähtötietojen pohjalta uusi muuttuja, radan korkeuspoikkeaman keskihajonnan muutosnopeus. Korkeuspoikkeaman keskihajonnan muutosnopeus määritetään tuentojen välillä mitattujen korkeuspoikkeaman mittaushavaintojen 50 m keskihajonnan muodostamasta käyrästä laskemalla



käyrän kulmakerroin. Korkeuspoikkeaman muutosnopeudella kuvataan radan pystysuuntaisen geometrian heikkenemistä ajan suhteen eli se soveltuu mainiosti radan kuormituskestävyyden kuvaamiseen.

Vertailut suoritettiin vertaamalla muita lähtötietoja kuormituskestävyyttä suoraan tai epäsuorasti kuvaaviin korkeuspoikkeaman, taipuman ja korkeuspoikkeaman hajonnan muutosnopeuden arvoihin. Vertailujen perusteella havaittiin useita kuormituskestävyyteen vaikuttavia vaikutussuhteita. Samalla vahvistui käsitys ratarakenteen ja kuormituskestävyyden monimutkaisuudesta.

Vertailujen perusteella havaittiin, että alusrakennekerroksen paksuudella ja sivuojien syvyydellä oli vaikutusta kaikkiin tarkasteltuihin kuormituskestävyyttä kuvaaviin suureisiin. Tulokset olivat kuitenkin hieman ristiriitaiset, sillä paksu alusrakenne ja suuri ojasyvyys pienensivät korkeuspoikkeamaa ja korkeuspoikkeaman muutosnopeutta, mutta lisäsivät taipuman suuruutta. Taipuman suuruuden kasvamisen havaittiin taas kasvattavan korkeuspoikkeaman muutosnopeutta. Taipuman suhde korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen ei kuitenkaan ollut yhtä selvä kuin taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhde alusrakenteen paksuuteen ja ojasyvyyteen.

Korkeuspoikkeaman muutosnopeutta tutkittiin myös tilastollisesti poimimalla havaintopistejoukosta pisteet, joissa korkeuspoikkeaman muutosnopeus oli nopeimmillaan ( $>0,001$  mm/vrk) ja hitaimmillaan ( $<0,0001$  mm/vrk). Merkittävimmät erot havaittiin ojasyvyydessä, alusrakenteen kosteusindeksissä, tukikerroksen iässä sekä routaeristekohteiden ja leikkausten osuudessa havaintopistemäärästä. Hitaan muutosnopeuden kohteissa ojasyvyys oli vasemmassa ojassa keskimäärin 1,71 metriä syvempi kuin nopean muutosnopeuden kohteissa. Suurempi ojasyvyys johtaa radan parempaan kuivatukseen ja pohjamaan vaikutuksen pienenemiseen. Alusrakenteen kosteusindeksi on hitaan muutosnopeuden kohteissa keskimäärin negatiivinen, eli kuivatustilanne on parempi kuin tutkitavalla rataosalla keskimäärin. Nopean muutosnopeuden kohteissa kosteusindeksin keskiarvo on noin 30 yksikköä suurempi.

Hitaan muutosnopeuden kohteissa ei esiintynyt lainkaan routaeristettyjä osuuksia, mutta nopean muutosnopeuden kohteista noin 15 % tapauksista oli routaeristetty. Tutkimuksen perusteella on kuitenkin vaikea sanoa, aiheuttavatko routaeristeet korkeuspoikkeaman nopeamman muutosnopeuden vai onko nopeaa geometrian heikkenemistä pyritty korjaamaan routaeristeillä.

Noin 65 % nopean muutosnopeuden kohteista sijaitsi kallioleikkauksissa, kun taas hitaan muutosnopeuden kohteista vain 20 % sijaitsi kallioleikkauksessa. Otannan perusteella geometria siis heikkenee nopeammin kallioleikkauksissa. Leikkausten haastavat kuivatulosuhteet ja ratarakenteeseen kohdistuvat suuremmat kuormat todennäköisesti selittävät eron kohteiden välillä.

Tukikerroksen iällä huomattiin olevan vaikutus korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen sekä vertailun että tilastollisen tarkastelun perusteella. Nopean ja hitaan muutosnopeuden kohteiden tilastollisessa tarkastelussa hitaan muutosnopeuden kohteiden tukikerroksen keski-ikä oli 25,5 vuotta ja nopean muutosnopeuden kohteissa vain 9,29 vuotta. Uuden tukikerroksen sepeli hienonee ja tiivistyy enemmän kuin vanha sepeli. Tiivistyminen havaitaan korkeuspoikkeaman muutosnopeuden kasvuna uudella tukikerroksella.

Vaikutussuhteiden tutkimista tehtiin myös useamman kuin kahden muuttujan välisillä tarkasteluilla. Tässä menetelmässä rata jaettiin neljään luokkaan jokaisen tarkasteltavan lähtötiedon perusteella. Ensimmäisessä vertailussa tarkasteltiin taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhdetta eri alusrakenteen kosteusluokissa, kun tukikerroksen ikä pidettiin vakiona. Tarkastelun yhteydessä todettiin, että alusrakenteen kosteus-tilalla on merkitystä taipuman ja korkeuspoikkeaman muutosnopeuden suhteeseen. Kosteustilan kasvaessa taipuma kasvaa ja nopeuttaa korkeuspoikkeaman muutosnopeutta.

Toisessa luokitteluperusteisessa vertailussa tutkittiin korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakennekerroksen paksuuden välistä suhdetta, kun tukikerroksen ikä ja paksuus olivat vakioita. Näin pyrittiin eliminoimaan tukikerroksen ominaisuuksien vaikutus tuloksiin. Korkeuspoikkeaman muutosnopeuden ja alusrakennekerroksen paksuuden välillä ei havaittu yhteyttä. Tästä voidaan päätellä, että suureiden väliseen suhteeseen vaikuttavat myös muut tekijät, kuten tukikerroksen ominaisuudet.

Merkittävä havainto luokitteluperusteisessa vertailussa oli se, että vanhimmalla, 29 vuotta vanhalla tukikerroksella ei esiintynyt lainkaan kosteimpia alusrakenteen kosteusluokkia ja 25-vuotiaalla tukikerroksellakin vain kosteusluokkia 1–3. Nuorimmalla, 5 vuotta vanhalla tukikerroksella sen sijaan esiintyi kaikkia alusrakenteen kosteusluokkia 1–4. Havainto voi johtua eri ikäisten tukikerrosten erisuuruudesta havaintopistemäärästä tai siitä, että tukikerroksen sepelinpuhdistuksella on pyritty korjaamaan ongelmia, jotka todellisuudessa johtuvat heikosta kuivatustilanteesta. Vanhan tukikerroksen alueella kuivatus on ollut kunnossa, jolloin ongelmia ratageometrian suhteen ei ole ollut alun perinkään yhtä paljon kuin nyt nuoremman tukikerroksen omaavilla osuuksilla.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa-antavia ja vaativat tarkempaa jatkotutkimusta. Tutkimuksen aikana huomattuja jatkotutkimustarpeita on esitelty seuraavassa kappaleessa.

## 8.2 Jatkotutkimustarpeet

Pitkän aikavälin tavoitteena on varsinaisen kuormituskestävyysmitoituksen kehittäminen, jossa suunnittelu perustuu radalta mitattuun tietoon. Kuormituskestävyysmitoituksen avulla korjaustoimenpiteiden, kuten esimerkiksi tukikerroksen vaihdon, routaeristeiden

asentamisen ja kuivatuksen parantamisen, kohdentaminen on perusteltua ja johtaa mahdollisimman homogeeniseen ja elinkaaritaloudelliseen ratkaisuun kuormituskestävyysnäkökulmasta katsottuna.

Radan ominaisuuksien vuorovaikutussuhteet vaativat vielä runsaasti lisää tarkastelua. Korkeuspoikkeaman muutosnopeus todettiin tämän tutkimuksen yhteydessä toimivaksi tavaksi tarkastella radan kuormituskestävyyttä. Luokitteluperusteiset vertailut voisivat olla käyttökelpoinen menetelmä, sillä näin voidaan tarkastella useampia ominaisuuksia ja eliminoida haluttujen ominaisuuksien vaikutus tuloksiin. Jotta laajempi vertailu olisi mahdollista, tulisi tarkasteltavan aineiston olla runsaampi ja sisältää enemmän havaintopisteitä. Lähtötietoaineistoa tulisi myös tarkastella useammasta kuin yhdestä kohteesta. Laajemman lähtötietoaineiston hallintaan ja käsittelyyn vaaditaan kuitenkin kehittyneempiä menetelmiä, kuten matemaattisia käsittelytapoja.

Alla on listattu tämän tutkimuksen yhteydessä havaittuja lisätutkimustarpeita.

Jatkotutkimuksissa tulisi tarkastella esimerkiksi

- tukikerroksen ominaisuuksien (esimerkiksi kosteustila, rakeisuus),
- muiden rakennekerrosmateriaalien ominaisuuksien (esimerkiksi rakeisuus),
- epäjatkuvuuskohtien (esimerkiksi sillat, rummut, vaihteet, paalulaatat, routaeristeet, kallioleikkaukset),
- eri rakennekerrosten paksuuksien välisen suhteen,
- tuennan,
- tukikerroksen puhdistuksen,
- pohjamaan ominaisuuksien ja
- liikennemäärän

vaikutusta korkeuspoikkeaman muutosnopeuteen.

Luokitteluperusteisten vertailujen suhteen tulisi tutkia useampien luokkien ja erilaisten luokkarajojen vaikutus tuloksiin. Lisäksi tulisi vertailla yhtä aikaa useampia muuttujia. Jotta useampien muuttujien vertailu olisi mahdollista, tulisi lähtötietoaineiston olla laajempi.

Korkeuspoikkeaman muutosnopeutta vastaava suure voitaisiin laskea myös esimerkiksi nuolikorkeuspoikkeamalle ja tehdä samat vertailut myös nuolikorkeuspoikkeaman muutosnopeudelle.

## LÄHTEET

Arcus, Liikennevirasto & Roadscanners Ratatieto (ETRS-TM35FIN) [viitattu 31.5.2016]. Saatavissa: [ratadata.fi](http://ratadata.fi).

Asp, O. 2011. Tukikerroksettomien rautatiesiltakansien kehittäminen. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 44/2011. 128 s.

Ballast Undercutter/Cleaner RM 80. Plasser Australia [viitattu 7.9.2016]. Saatavissa: [http://www.plasser.com.au/en/p\\_ballast\\_cleaning/rm80.htm](http://www.plasser.com.au/en/p_ballast_cleaning/rm80.htm).

Brown, S.F. 1993. Introduction to Pavement Design. Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation. Oulu, Oulun yliopisto. Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 22. 1-12 p.

Buco S.A. Rail solutions: Undersleeper pads. Buco S.A. Buenos Aires, Argentina. 2012 [viitattu 23.2.2016]. Saatavissa: [http://www.buco.com.ar/EN/industrial\\_line/rail\\_solutions/#undersleeper-pads](http://www.buco.com.ar/EN/industrial_line/rail_solutions/#undersleeper-pads).

Doré, G. & Zubeck, H.K. 2009. Cold regions pavement engineering. New York, USA, ASCE (American Society of Civil Engineering). 416 p.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki, Rakennustieto. 357 s.

Esvelde, C. 2001. Modern railway track. 2nd ed. Zaltbommel, The Netherlands, MRT-Productions. 654 p.

GTK Maankamara. Geologian tutkimuskeskus [viitattu 18.3.2016]. Saatavissa: <http://www.gtk.fi/tietopalvelut/palvelukuvaukset/maankamara.html>.

Göbel, C., Lieberenz, K. & Richter, F. 1996. Der Eisenbahnunterbau. Mainz, Eisenbahn-Fachverlag. 332 p.

Hartikainen, O. & Jämsä, H. 1986. Tien päällysrakenteen suunnittelu. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu. 122 s.

Hyvärinen, J. 2013. Radan päällysrakenteen kunnonhallinnan kehittäminen. Opinnäytetyö. Riihimäki. Hämeen ammattikorkeakoulu, Liikennealan koulutusohjelma. 45 s.

Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. & Christie, D. 2006. Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. Ground Improvement 10, 3, pp. 91-101.

Indraratna, B., Nimbalkar, S. & Tennakoon, N. 2010. The behaviour of ballasted track foundations: track drainage and geosynthetic reinforcement. GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design (GSP 199), Orlando, Florida, USA, February 20-24, 2010. American Society of Civil Engineers. pp. 2378-2387.

Indraratna, B., Salim, W. & Rujikiatkamjorn, C. 2011. Advanced Rail Geotechnology -- Ballasted Track. Boca Raton, CRC Press. 432 p.

InfraRYL 2010. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1 Väylät ja alueet. Helsinki, Rakennustieto Oy. 555 s.

Isohaka, M. 2014. Veden saatavilla olon vaikutus radan routimiseen. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 132 s.

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. 3. painos. Tampere, Tammertekniikka. 387 s.

Kalliainen, A., Kolisoja, P. & Nurmikolu, A. 2014. Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2014. 174 s.

Kalliainen, A., Luomala, H., Jäniskangas, T., Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2011. Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. 152 s.

Kalliainen, A. & Kolisoja, P. 2013. Ratapenkereen leveys ja luiskakaltevuus, loppuraportti. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2013. 85 s.

Kiuru, T., Sipilä, J., Vihma, S. & Viljanen, M. 2015. Rataverkon välityskyvyn kehityskuva 2035. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2015. 64 s.

Kolisoja, P., Levomäki, M., Mäkelä, E. & Niskanen, P. 1999. Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Helsinki, Ratahallintokeskus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A6/1999. 135 s.

Korkeamäki, S. 2011. Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 4/2011. 93 s.

Korkiala-Tanttu, L., Törnqvist, J., Eskola, P., Pienimäki, M., Spoof, H. & Mroueh, U. 2005. Elinkaaritarkastelut tienpidon hankintoihin. Helsinki, Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 13/2005. 43 s.

Lahti, O. 2008. Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella. Helsinki, Ratahallintokeskus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A12/2008. 90 s.

Lichtberger, B. 2005. Track compendium. Hamburg, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. 634 p.

Liikennevirasto 2012a. Geolujitetut maarakenteet: Tiegeotekniikan käsikirja. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston oppaita 2/2012. 159 s.

Liikennevirasto 2016a. Henkilöliikenteen matkat vuonna 2015. Helsinki, Liikennevirasto. 1 s.

Liikennevirasto 2013a. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 14 Vaihteiden tarkastus ja kunnonssapito. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 7/2013. 27 s.

Liikennevirasto 2014a. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3 Radan rakenne. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 17/2014. 38 s.

Liikennevirasto 2012b. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 4 Vaihteet. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 22/2012. 47 s.

Liikennevirasto 2013b. Rataverkon kuvaus 1.1.2014. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston väylätietoja 5/2013. 72 s.

Liikennevirasto 2014b. Rautateiden verkkoselostus 2016. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston väylätietoja 3/2014. 59 s.

Liikennevirasto 2012c. Sillan geotekninen suunnittelu. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 11/2012. 49 s.

Liikennevirasto 2015. Suomen rautatietilasto 2015. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tilastoja 6/2015. 51 s.

Liikennevirasto 2010. Syvästabiloinnin suunnittelu: Tien pohjarakenteiden suunnitteluohteet. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 11/2010. 57 s.

Liikennevirasto 2016b. Tavaraliikenteen kuljetusvirrat 2015. Helsinki, Liikennevirasto. 1 s.

Liikennevirasto 2013c. Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 5/2013. 114 s.

Lundqvist, A. & Dahlberg, T. 2005. Load impact on railway track due to unsupported sleepers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 219, 2, pp. 67-77.

Luomala, H., Peltokangas, O., Rantala, T. & Nurmikolu, A. 2015. Radan kokonaisjärkekyiden mittaaminen ja modifiointi. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015. 108 s.

Mäntynen, J., Kallberg, H., Kalenoja, H., Rauhamäki, H., Pöllänen, M., Luukkonen, T. & Karhula, K. 2012. Liikennetekniikan perusteet : opetusmoniste. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenteen tutkimuskeskus Verne. 216 s.

Nielsen, J.C.O. & Igeland, A. 1995. Vertical dynamic interaction between train and track influence of wheel and track imperfections. Journal of Sound and Vibration 187, 5, pp. 825-839.

Nummelin, M. 2004. Railway turnouts - Rautatievaihteet. Helsinki, Finnish Rail Administration. 116 p.

Nurmikolu, A. 2004. Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa: Kirjallisuusselvitys. Helsinki, Ratahallintokeskus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A4/2004. 193 s.

Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2010. Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010. 64 s.

Odemark, N. 1949. Undersökning av elasticitetegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin. Stockholm, Statens Väginstitut. 104 p.

PANK-9001. 2002. Kantavuuden mittausta, Loadman. PANK Päällystealan neuvottelukunta. 4 s.

Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. 2013. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013. 190 s.

Peltokangas, O. & Nurmikolu, A. 2015. Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2015. 132 s.

Pihlajamäki, J. 2001. Liikennesuorituksen laskeminen. Helsinki, Tiehallinto. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994-2001 18 s.

Piippo, H., Belt, J. & Ehrola, E. 1990. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO 1987-1992. Tien kantavuuden mittauslaitteet ja eri laitteilla määritetyt kantavuudet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 87 s.

Pylkkänen, K. & Nurmikolu, A. 2015. Routa ja routuminen ratarakenteissa. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015. 210 s.

Rantala, T., Kerokoski, O. & Nurmikolu, A. 2013. Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit: Kirjallisuusselvitys. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36/2013. 156 s.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 2009. Geotekniikka. 16. painos. Helsinki, Otatieto. 301 s.

Ratahallintokeskus 2005. Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. Helsinki, Ratahallintokeskus. 22 s.

Ratahallintokeskus 1995. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 1 Yleiset perusteet. Helsinki, Ratahallintokeskus. 8 s.

Ratahallintokeskus 2002. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 11 Radan päällysrakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 87 s.

Ratahallintokeskus 2004. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 13 Radan tarkastus. Helsinki, Ratahallintokeskus. 51 s.

Ratahallintokeskus 2000. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 15 Radan kunnossapito. Helsinki, Ratahallintokeskus. 63 s.

Ratahallintokeskus 1998. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 19 Jatkuvakiskoraiteet ja -vaihteet. Helsinki, Ratahallintokeskus. 34 s.

Ratahallintokeskus 2006. Rumpujen korjausohje RUMKO. Helsinki, Ratahallintokeskus. 156 s.

RT 38675. 2015. Fornit- ja Fortrac-lujiteverkot, Stablenka-lujitekangas, Robutec-lujitekangas, DuoGrid-yhdistelmälujite, Comtrac-yhdistelmälujite. Kaitos Oy. Helsinki, Rakennustietosäätiö. 4 s.

Rälsbefästningar. Svenska Järnvägsklubben. 31.8.2010 [viitattu 23.2.2016]. Saatavissa: <http://www.postvagnen.com/forum/index.php?mode=thread&id=339968>.

Saarin, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherakkyys. Helsinki, Ratahallintokeskus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A7/2008. 75 s.

Sara, H. 2012. Geovahvisteet: Lujitteen ja maan yhteistoiminta ja mitoituslujuus. Geolujitekoulutus, Helsinki, 13.3.2012. Helsinki, Liikennevirasto.

Selig, E.T. & Waters, J.M. 1994. Track Geotechnology and Substructure Management. London, UK, T. Telford. 407 p.

SFS-EN 13450 + AC. 2002. Raidesepelikiviainekset=Aggregates for railway ballast. Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 31 s.

Silvast, M. & Nurmikolu, A. 2015. Maatutkamenetelmän soveltaminen ratarakenteen kunnossapito- ja parantamissuunnittelussa. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2015. 99 s.

Sito Oy 2008. Rantaradan Helsinki-Turku ratatekninen ja liikenteellinen selvitys. Helsinki, Ratahallintokeskus. 96 s.

Smekal, A. 2008. Strengthening Methods for Subsoil under Existing Railway Lines. 8th World Congress on Railway Research, Seoul, Korea, May 18-22, 2008. Korea, WCRR. 11 p.

Soveri, J. & Varjo, M. 1977. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955-1975. Helsinki, Vesihallitus. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 20. 57 s.

Taipale, K. & Saarnisto, M. 1991. Tulivuorista jääkausiin : Suomen maankamaraan kehitys. Porvoo, WSOY. 416 s.



Tammirinne, M. 2002. Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus: TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Helsinki, Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 7/2002. 204 s.

Tiehallinto 2004. Tierakenteen suunnittelu. Helsinki, Tiehallinto. 69 s.

Tuominen, M. 2004. Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset. Helsinki, Ratahallintokeskus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A3/2004. 130 s.

UIC 2009. Under Sleeper Pads - Summarising Report. 4th ed. Vienna, International Union of Railways. 40 p.

Varis, R. 2014. Liikkuvan kaluston aiheuttama vaakavärähtely rautatievaihteissa ja sen vaikutus kääntöavustimen toimintaan. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 3/2014. 134 s.

Vazirani, V.N. & Chandola, S.P. 2006. Concise handbook of civil engineering. 4th ed. New Delhi, India, S. Chand & Company Ltd. 1116 p.

Vinter, J. 2015. Eristyskerroksen materiaalin vaikutus maanvaraisen ratapenkereen toimivuuteen. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 30/2015. 98 s.

Wong, M. Pandrol clip holding rail to concrete sleeper. Wikipedia. 21.12.2007 [viitattu 13.9.2016]. Saatavissa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pandrol-on-concrete.jpg>.

Zwanenburg, W. 2009. Modelling Degradation Processes of Switches & Crossings for Maintenance & Renewal Planning on the Swiss Railway Network. Dissertation. Lausanne. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 109 p.